Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

**Галина Байрак, Богдан Муха**

# ДИСТАНЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕМЛІ

Навчальний посібник

*Рекомендовано*
*Міністерством освіти і науки України*

Львів
Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка
2010

УДК 528.8:910.2(075.8)
ББК Д8я73+Д13+я73
Б 18

**Рецензенти:**
д-р геогр. наук, проф. *С.Ю. Бортник*
(Київський національний університет ім. Т.Г. Шевченка);

д-р техн. наук., проф. *Г.Я. Красовський*
(Національний аерокосмічний університет
"Харківський авіаційний інститут";

д-р техн. наук, проф. *О.Л. Дорожинський*
(Національний університет "Львівська політехніка")

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України*
*як навчальний посібник для студентів географічних спеціальностей*
*вищих навчальних закладів.*
*Лист № 1.4/18-Г-1492 від 23.06.2008 р.*

**Байрак Г.Р., Муха Б.П.**
Б 18 Дистанційні дослідження Землі : Навчальний посібник / Галина Байрак, Богдан Муха. – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – 712 с.

ISBN 978-966-613-761-9

Розглянуто способи реєстрації та методи виокремлення потрібної інформації, можливості її перетворення до виду, придатного для інтерпретації. Показано основи дешифрування та вимірювань на знімках. Подано також методи первинного опрацювання й читання знімків, їхнього використання в географічних та споріднених з ними галузях просторових досліджень.

Для спеціалістів з інтерпретації даних дистанційного зондування Землі, студентів географічних та інших природничих факультетів університетів України.

**УДК 528.8:910.2(075.8)**
**ББК Д8я73+Д13+я73**

ISBN 978-966-613-761-9
© Байрак Г.Р., Муха Б.П., 2010
© Львівський національний університет імені Івана Франка, 2010

# Передмова

Дистанційні дослідження Землі (ДДЗ) мають історію порівняно недовгу, але швидкопоступальну, успішну, навіть евристичну. Вони змінили виробничі технології, зробили революцію в дистанційних комунікаціях, змінили бачення людиною свого місця у світі, розширили знання про світ, змінили, навіть, ментальність людини.

У науці ДДЗ вже понад 40 років розвивається як міждисциплінарний метод. Атрибутивними стали ДДЗ для тих наук, об'єктами дослідження яких є Земля як планета, поверхня Землі, її приповерхневі формації, глибокі структури. Для багатьох досліджень методи ДДЗ є настільки важливими, що проведення пошуків традиційними способами без використання методів і матеріалів ДДЗ призводить до превентивного визнання кінцевих результатів некондиційними.

Географи, які об'єктами своїх досліджень мають певну територію, акваторію чи їхні поєднання завжди повинні використовувати можливості дистанційних досліджень Землі, уже наявні матеріали таких досліджень, та формувати нові запити щодо їхнього вдосконалення для вирішення певних проблем. Саме тому вже майже 40 років в перелік найважливіших дисциплін підготовки географів вводиться курс з традиційною назвою "Аерокосмічні методи географічних досліджень".

Студенти-географи вже в процесі навчання, в час виконання курсових та дипломних робіт повинні використовувати багаті і доступні фонди матеріалів дистанційного вивчення Землі. У пошукових системах Інтернету вже наявні різноманітні знімки всієї земної кулі з такою детальністю, про яку ще десять років тому професійні дослідники могли тільки мріяти.

Проте осмислено використати ці матеріали зможе тільки той дослідник чи студент, який розуміє суть методів знімання, особливості формування знімків під час різних методів знімання, особливості інформації, яку переносять електромагнітні хвилі різної довжини та частоти, особливості їхнього генерування чи відбиття різ-

ними поверхнями та структурами, специфіку трансформації цих хвиль при проходженні через атмосферу тощо.

З метою надання такої інформації про аерокосмічні методи досліджень, яка зробила б матеріали цих досліджень більш зрозумілими та придатними для глибшого прочитання, для ширшого (не просто як оригінальну картинку) трактування, для збагачення вихідних матеріалів і підкріплення наукових висновків пропонуємо цей посібник.

У праці відображено картину світу, особливо приземного простору, що пронизаний потоками електромагнітних хвиль (ЕМХ), який вібрує і пульсує ними, видаючи інформацію про себе. Розглянуто способи реєстрації ЕМХ та методи виокремлення потрібної інформації, можливості її перетворення до вигляду, придатного для інтерпретації. Подано історію розвитку ДДЗ, показано основи дешифрування та вимірювань на знімках, подано також методи первинного опрацювання й прочитання знімків, використання їх в географічних та споріднених з ними галузях просторових досліджень.

В посібнику підібрано інформацію про залежності спектральних яскравостей наземних об'єктів від їхньої природи, від зміни їхніх сезонних станів, астрономічних впливів, специфіки фізичної взаємодії речовини та енергії.

З метою закріплення знань, практичного їхнього застосування під час географічних досліджень подано також необхідні конспективні викладки та нагадування, здебільшого у виносках, з курсів фізики, а також з основ фізичної географії, астрономії, геології, геоморфології, ґрунтознавства, метеорології, гідрології, ботаніки і геоботаніки, геофізики та геохімії ландшафтів, економічної географії та багатьох інших навчальних дисциплін.

Великий розділ стосується історії розвитку дистанційних досліджень у світі і в Україні. Підручник написаний з використанням багатьох опублікованих спеціалізованих монографій та посібників, а також власного досвіду проведення знімань та досвіду опрацювання матеріалів дистанційних досліджень.

Поняття "Дистанційні дослідження" у міжнародній практиці має такі аналоги: "Remote sensing" (Дистанційне зондування) в англомовних країнах; "Дистанційне зондування Землі" в Болгарії; "Fernerkundung der Erde" (Дистанційна розвідка Землі) в Німеччині; "Interpretacja zdiięć lotniczych", "Teledetekcja" (Дистанційне виявлення) в Польщі; "Аэрокосмические методы географических исследований", "Дистанционное зондирование" в Росії. Означення "Аерокосмічні дослідження" вживають також і в Україні, проте слід розуміти, що поняття "Дистанційні дослідження Землі" або "Дистанційне зондування Землі" є універсальнішим, таким, що не наголошує на розмежуванні між атмосферою і космічним простором[1],

на визначення конкретики в поняттях аеро- та космічні дослідження, які розрізняються, в основному, носіями знімальної апаратури. Щодо відмін у поняттях "Дистанційне зондування" і "Дистанційні дослідження", то вважаємо, що перша назва акцентує на технічних умовах аерокосмічних знімань, параметрах космічних носіїв і знімальної апаратури, тоді як друге поняття – більшу увагу на дешифруванні та інтерпретації наземних об'єктів.

Підручник є першим україномовним виданням з курсу "Дистанційне зондування Землі". Його автори викладають навчальні дисципліни з методів аерокосмічних досліджень на географічному факультеті Львівського національного університету імені Івана Франка.

Галина Байрак написала такі підрозділи: 1; 3.1; 4.1, 4.2, 4.5, 4.7; 5.2, 5.3, 5.4, 5.8, 5.9, 5.10. Богдан Муха написав підрозділи: 1.6, 2.1, 2.2; 3.2, 3.3, 3.4; 4.3, 4.4, 4.6; 5.1, 5.5, 5.6, 5.7, 5.11.

Автори вдячні всім, хто подав ділові поради, висловив критичні зауваження та допомагав у підготовці видання посібника.

[1] Фактично, більшість "космічних" супутників Землі літають у верхніх шарах атмосфери.

# СКОРОЧЕННЯ, ЧАСТО ВЖИВАНІ В ТЕКСТІ:

ДДЗ – дистанційні дослідження Землі;
ДЗЗ – дистанційне зондування Землі;
ЕМХ – електромагнітні хвилі;
МКС – міжнародна космічна станція;
ПКК – пілотовані космічні кораблі;
ШСЗ – штучні супутники Землі;
КА – космічний апарат;
РАШ – радіаційно-активний шар (земної поверхні).
РН – ракета-носій;
МС – мікросупутник;
МСУ – багатозональний скануючий пристрій;
НКАУ – Національне космічне агенство України;
НАНУ – Національна академія наук України;
ЦУП – центр управління польотами;
$Р_л$ – радіолокаційний;
$І_н$ – інфрачервоний;
НВЧ – надвисокочастотний.

# Розділ 1

# ІСТОРІЯ АЕРОФОТО– І КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Космічне землезнавство є лише частиною науково-технічного напряму, що бурхливо розвивається, відомого під назвою дистанційних (аерокосмічних) досліджень Землі. Під терміном "*дистанційні дослідження*" розуміють спостереження і вивчення природних та антропогенних об'єктів за допомогою приладів, відокремлених від об'єктів, які вивчають, деякою відстанню безкабельного контакту (наприклад, спостереження в бінокль, телескоп, огляд земної поверхні з повітряних куль, літаків, зондів, ракет, супутників Землі, орбітальних станцій і комплексів, міжпланетних космічних кораблів).

## 1.1. Становлення і розвиток аероспостережень

Початком епохи дистанційних візуальних досліджень поверхні Землі, зазвичай, вважають запуск першого аеростата – повітряної кулі братів Монгольфь'є в Анноне поблизу Ліона 4 червня 1783 р. Проте 21 листопада того самого року аеронавти Пілатр де Розье і маркіз д'Арлан піднялися на аеростаті в повітря і зробили перший політ над Парижем, пролетівши близько 10 км. Через десять днів, 1 грудня, фізик Ж. Шарль на аеростаті, наповненому воднем, пролетів більш ніж 50 км і піднявся на висоту понад 3,5 км. Найближчими роками повітроплавання охопило всю Європу. Одним з перших аеронавтів в Росії був прославлений генерал С.Л. Львов, що піднімався в повітря разом з французом Ж. Гарнереном.

Новий етап у розвитку дистанційних досліджень відкрило широке використання матеріалів аерофотознімань під час вивчення поверхні Землі. Піонером аерофотознімань був знаменитий французький фотограф і повітроплавець Гаспар Турнашон, що здобув популярність під псевдонімом *Ф. Надар*. З *1858 р.* він проводив знімання з аеростатів, і його фотографії Парижа з висоти 80 і 200 м до сьогодні зберігають історичну та наукову цінність. Одночасно із зйомками Ф. Надара в 1858–1865 рр. офіцер французьких інженерних військ Е. Сивіаль провів високоточні знімання Піренеїв і Альп з вершин цих гірських хребтів, що супроводжувалися геологічним і орографічним дешифруванням отриманих фотопанорам і наземним вивченням геологічної будови знятих територій. У роки громадянської війни в США (1861–1865) аерофотознімання з повітряних куль чи аеростатів починали широко застосовуватися в армії, що діяла, з метою військового рекогноскування і розвідки, а в 1880-х рр. аерофотознімки знаходять застосування у Франції і Швейцарії під час здійснення великомасштабних геологознімальних і геологопошукових робіт та проектування великих інженерно-технічних споруд: залізниць, дамб, тунелів.

У Росії фотографування з аеростатів почали проводити з середини 1880-х рр. У *1886 р.* начальник повітряноплавальної команди військового відомства поручик *О.М. Кованько* отримав вдалі знімки Санкт-Петербурга і Кронштадта з висоти 600–1400 м. У ті ж роки російський фотограф В.Ф. Павленков і француз Е. Лосседа одночасно розробили основи фотограмметрії.

Новий етап у розвитку аероспостережень розпочався з винайдення літака *братами Райт* у 1903 р. Швидкий розвиток авіації на поч. XX ст. дав змогу використовувати її для повітряного фотографування. З цього часу процес фотографування земної поверхні з літаків стали називати *аерофотозніманням*.

Широке застосування аерофотознімань під час наземних інженерних робіт стимулювало створення в 1890–1900-х рр. все більш досконалої фотоапаратури для отримання високоякісних знімків з повітря. В кінці 1890-х рр. під час досліджень уздовж траси Східно-Китайської залізниці російський інженер Р.Ю. Тілле сконструював багатооб'єктивний фотоапарат для здійснення з прив'язних аеростатів детальних фотопанорамних знімань, які

використовувалися під час складання топографічних карт і планів. Так вперше було застосовано стереофотознімання для інженерних цілей. На початку XX ст. полковник В.М. Потте розробив перший у світі плівковий аерофотоапарат.

В період 1908–1914 рр. у низці країн проводили перші дослідні аерофотознімальні польоти і розробляли методи аерофотознімання. Практичного застосування ці методи набули під час Першої світової війни, починаючи з 1 листопада 1914 р. під час осади Перемишля. З цього часу у російській армії були організовані відділи для виконання військової аерофоторозвідки, а процес розпізнавання об'єктів, зображених на аерофотознімках, означували *дешифруванням*.

Аерофотознімки почали широко застосовувати в наукових дослідженнях і господарській діяльності. Перші спроби застосування аерофотознімання для народногосподарських цілей виконувало російське лісове відомство у 1922 р. У 1923 р. було організоване Всесоюзне товариство добровільного повітряного флоту ("Доброльот"). У 1924 р. в його системі був створений аерофотознімальний відділ, який очолював М.Д. Бонч-Бруєвич і який став засновником громадянського аерофотознімання у СРСР. Перша дослідна робота "Доброльота" з аерофотознімання була проведена у 1925 р. в районі м. Можайська на площі 400 га.

На Україні одночасно з товариством "Доброльот" було створено товариство "Укрвоздухпуть", яке у 1925 р. здійснювало аерофотознімальні роботи для землевпорядкування. У 1930 р. це товариство разом з "Доброльотом" злились в єдине Державне аерознімальне підприємство "Держаерофотозйомка", яке надалі ввійшло у Головне управління геодезії і картографії (ГУГК).

30-ті роки XX ст. були ознаменовані бурхливим розвитком аерометодів. Налагоджено аерофототопографічне виробництво, створено багато відомчих аерофотознімальних організацій. Аерофотозніманням почали "покривати" обширну територію колишнього Радянського Союзу. У ці роки аерофотометоди широко використовували для вивчення Арктики, гірсько-тайгових районів Східного Сибіру у зв'язку з пошуками під час будівництва Байкало-Амурської залізничної магістралі, що продовжувались до 1940 р., а також для таксації лісів. З'явилися перші спроби використання аерофотознімків для дослідження пустель, рік, боліт,

рельєфу тощо, були відкриті нові гірські льодовики і навіть цілі гірські хребти.

Вперше на великих інформаційних можливостях фотознімків, зроблених з літака, наголошує в ці роки академік О.Е. Ферсман. Його вважають ініціатором впровадження аерофотометодів у геологічні і географічні дослідження. Зокрема, він, наприклад, писав, що аерознімання не тільки нове знаряддя для роботи у важкодоступних районах земної поверхні, а й новий метод для розуміння низки проблем у різних галузях географії. Ферсман говорив, що ні один географ, який вивчає яку-небудь територію, не може вважати свою роботу виконаною, якщо не перевірить свої висновки шляхом візуальних спостережень з літака. Цікавим з цього приводу є також висловлювання французького географа Е. Мартонна, який зазначав, що географу, який ніколи не літав, можна сказати, що він неповноцінний географ.

Ставала очевидною велика наукова і практична цінність аерофотознімання. За кордоном, як і в тодішньому Радянському Союзі, почали застосовувати аерофотознімання для природничих досліджень у 1933–1936 рр. Ці методи отримали найбільший розвиток у США та країнах Британської імперії. Аеровізуальні спостереження та аерофотоматеріали використовували під час рекогноскувальних робіт у важкодоступних районах Аляски, Канади, Мексики. Завдяки аерофотометодам за короткий час були досліджені райони, вивчення яких звичайними експедиційними методами потребувало би десятиліття. З 1943 р. до 1947 р. у США розробляли питання, пов'язані зі стереоскопічним вивченням аерофотознімків, у низці наукових статей описували приклади використання аерометодів для пошуків корисних копалин. Тому деякі великі американські компанії, які займалися розвідуванням покладів золота, металічних руд чи вуглеводнів, організували спеціальні аерофотогеологічні бюро.

В час Другої світової війни дистанційні методи отримали суто військове спрямування. Аерофоторозвідку застосовували під час планування всіх масштабних військових операцій.

Були створені для знімань спеціальні літаки, швидкісна фото та кіноапаратура, нові фотоматеріали, хімічні реактиви, і що також важливо – методики швидкого спеціалізованого дешифрування.

У післявоєнний період у галузі аерофотометодів у світі були досягнуті великі успіхи. Створені спеціальні топографічні аерофотоапарати, розроблені методи і прилади для ретельної обробки та друку аерофотознімків, впроваджені у виробництво новіші види фотоматеріалів. Вже до 1955 р. здебільшого на всю територію СРСР були підготовлені карти дрібного масштабу і почалось виконання середньо- і великомасштабних аерофотознімань. Аерометоди стали широко використовувати в геологічних, геоморфологічних, ґрунтових, геоботанічних, гідрографічних, океанологічних дослідженнях. До кінця 50-х рр. XX ст. не залишилось географічних наук, де вони б не знайшли застосування. Матеріали аерофотознімань стали використовувати також для пошуків і проектування шляхів сполучень, гідроелектростанцій, під час будівництва міст, портів, ліній електропередач, трубопроводів, при пошуках родовищ корисних копалин тощо.

У 60-ті роки XX ст. конструюють нові високоточні стереофотограмметричні прилади для складання карт за аерофотознімками. Удосконалюють методику і технологію картографування за аерофотознімками, а також методи перетворення і фільтрації зображень. Впроваджують обчислювальну техніку, нові фотоелектронні види і способи знімань, фотоплівки для кольорового і спектрозонального знімання.

Створюють спеціальний літак АН-30, з висотою польоту від 1000 до 7000 м, повністю укомплектований для аерофотознімання. Зокрема, кабіна літака мала великий огляд, п'ять знімальних люків, у які прилаштовані аерофотоапарати, автоматичне управління процесом аерознімання та усунення похибок. У багатьох містах тодішнього СРСР створюють спеціальні аерофотознімальні загони, які оснащують літаками АН-30. Ці літаки обслуговують також деякі галузеві відомства – аерогеологічне, лісове господарство, гідрометеослужбу.

Отже, історія дистанційних досліджень почалась зі знімань земної поверхні з повітряних куль та аеростатів, а пізніше – з літаків та гвинтокрилів. Були поширені як візуальні аероспостереження, так і фотографування з подальшим дешифруванням отриманих аерофотознімків. Особливе місце в дистанційних методах другої половини XX ст. посідало знімання земної поверхні з космічного простору.

## 1.2. Від перших космічних супутників до пілотованих кораблів

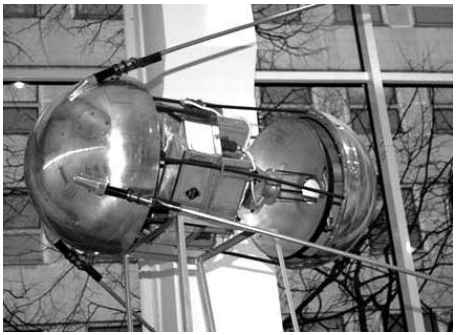
Перші науково обґрунтовані публікації з теоретичної космонавтики належать російському вченому К.Е. Ціолковському. Його роботи, присвячені теорії космічного польоту, були опубліковані у 1903 р., але тільки в середині 40-х років XX ст. космічні польоти ракет стали можливими.

У міру розвитку авіації аерофотознімання земної поверхні почали проводити з великих висот все більш високоякісними фотографічними апаратами, "покривати" ним обширні території. Ще у 1930-х рр. у Європі і США почали проводити висотні аерофотознімання з аеростатів, що піднімаються у верхні шари атмосфери. У результаті були отримані перші наддрібномасштабні фотографії земної поверхні.

Поява балістичних ракет в кінці Другої світової війни дала змогу проводити фотографування Землі вже з космічних висот (більше ніж 100 км). Перші опубліковані фотографії Землі з космосу були отримані в *1945 р*. з балістичної ракети ФАУ-2, запущеної в США з полігону Уайт-сендс в штаті Нью-Мексіко на висоту 120 км. Наприкінці 1940-х – початку 1950-х рр. у космос були запущені десятки дослідницьких балістичних ракет систем ФАУ-2, "Вікінг", "Аеробі" та ін., з яких проводилося фотографування земної поверхні. Запуски балістичних ракет здійснювали у вертикальному напрямі і в разі досягнення ними максимальної висоти відбувалось їхнє падіння на Землю. З траєкторії падіння на висоті 40–370 км вони виконували фото, інфрачервоне, спектрографічне знімання земної поверхні. Масштаби отриманих фотозображень були у межах 1:50 000 – 1:100 000. Для деяких ділянок поверхні Північної Америки та Європи за матеріалами знімань були складені перші монтажі з космічних фотознімків.

Проте, традиційно, початком власне космічної ери вважають кінець 50-х років XX ст., коли апарати дистанційного зондування стали рухатись по навколоземних орбітах. *4 жовтня 1957 р*. в СРСР був запущений перший штучний супутник Землі (ШСЗ). Він важив 86,3 кг (рис. 1.1). Прорвавшись крізь земну атмосферу, перша космічна "ластівка" винесла в навколоземний простір наукові при-

*а*



*б*

Рис. 1.1. Перший космічний супутник Землі:
*а* – загальний вигляд супутника, *б* – макет в музеї ракетно-космічного комплексу "Енергія" ім. С.П. Корольова (м. Корольов Московської обл.).

лади і радіопередавачі. Вони передали на Землю першу наукову інформацію про космічний простір, що оточує Землю. Перший супутник почав обертатися навколо Землі по еліптичній орбіті з параметрами: апогей – 947 км (найбільш віддалений від Землі пункт орбіти) і перигей – 228 км (найближчий до Землі пункт орбіти). Нахил площини орбіти до площини екватора становив 65°. Свій перший оберт супутник зробив за 1 год. 36 хв. і виконав за добу близько 15 обертів.

Порівняно низьке розташування перигея орбіти викликало гальмування супутника в розряджених шарах земної атмосфери і скорочувало його період обертання на 2,9 с. на добу. Таке незначне скорочення часу обертання свідчило про те, що супутник знижувався дуже поволі, причому спочатку зменшувався апогей, а сама орбіта поступово наближалася до кола. Через 20 днів космічний первісток замовк – вичерпалися батареї його передавачів.

Розжарюваний Сонцем і замерзаючий в земній тіні, він безмовно кружляв над планетою, що послала його, відбиваючи сонячні промені та імпульси радіолокаторів. Поступово опускаючись, він проіснував ще близько двох з половиною місяців і згорів в нижніх щільніших шарах атмосфери.

Проте завдяки польоту першого супутника вчені отримали цінні відомості. Ретельно вивчивши поступову зміну орбіти завдяки гальмуванню в атмосфері, учені змогли розрахувати щіль-

ність атмосфери на всіх висотах, де пролетів супутник, і за цими даними точніше передбачити зміну орбіт наступних супутників. Визначення точної траєкторії штучних супутників дало змогу провести низку геофізичних досліджень, уточнити форму Землі, точніше вивчити її сплюснутість, що дало можливість складати точніші географічні карти.

Дуже велике значення мало вивчення умов проходження радіохвиль через іоносферу, тобто через наелектризовані верхні шари земної атмосфери. Радіохвилі, послані з супутника, ніби наскрізь промацували іоносферу. Аналіз цих результатів дозволив істотно уточнити будову газової оболонки Землі.

Другий радянський супутник був виведений на більш витягнуту орбіту 3 листопада 1957 р. Якщо ракета першого супутника дозволила підняти його на 947 км (апогей), то ракета другого супутника була могутнішою. При майже тій самій мінімальній висоті підйому апогей орбіти досяг 1 671 км, хоч супутник важив значно більше – 508,3 кг.

Третій супутник піднявся ще вище – на 1 880 км і був ще важчим. Він мав вагу 1 327 кг.

Услід за радянськими супутниками вийшли на свої орбіти американські. Програму ракетних досліджень за планом Міжнародного геофізичного року американці почали здійснювати пізніше. Тільки 31 січня *1958 р.* після декількох невдалих спроб американцям вдалося вивести на орбіту свій перший штучний супутник Землі "*Експлорер-1*" ("Дослідник-1"). Він мав вагу 13,96 кг і був обладнаний апаратурою для вивчення космічних променів, мікрометеоритів, а також для вимірювання температури оболонки супутника і газу, що заповнював його внутрішній об'єм.

Наступний супутник американців – "Авангард" важив 1,5 кг. Він не мав на борту взагалі ніякої наукової апаратури і був призначений тільки для випробувань радіопередавачів і сонячних батарей.

Пізніше американці вивели на орбіти декілька десятків супутників. Їхня вага коливалася від кількох десятків до кількох сотень кілограмів. За їхньою допомогою американським ученим вдалося отримати низку важливих даних про будову верхньої атмосфери і навколоземного простору. Ці результати могли б бути значнішими, проте під час запуску багато з них мали військові цілі.

Запуски перших автоматичних міжпланетних станцій (АМС) були здійснені: у США – "Піонер-1" (11 жовтня 1958 р.), у СРСР – "Луна-1" (2 січня 1959 р.). Так, за 34 години польоту ракета "Луна-1" пройшла 370 тис. км, перетнула орбіту Місяця і вийшла в навколосонячний простір. Після цього ще близько 30 год. вели спостереження за її польотом і приймали зі встановлених на ній приладів цінну наукову інформацію. Вперше прилади, які послала людина, вивчали космічний простір впродовж 500 тис. км від Землі. Відомості, отримані в цьому польоті, суттєво доповнили знання про одне з найважливіших відкриттів перших років космічної ери – навколоземні пояси радіації. Окрім різних вимірювань, впродовж 500 тис. км польоту велися спостереження за газовим складом міжпланетного середовища, метеоритами, космічними променями тощо.

Не менш дивовижним був політ другої радянської космічної ракети "Луна-2", запущеної 12 вересня 1959 р. Контейнер з приладами, донесений цією ракетою 14 вересня о 00 год. 02 хв. торкнувся поверхні Місяця. Вперше за всю історію апарат, створений руками людини, досяг іншого небесного тіла і доставив на малу "планету" вимпел із зображенням Герба СРСР. Апаратура "Луна-2" встановила, що Місяць не має магнітного поля і поясів радіації (в межах точності приладів).

Досягнення третьої космічної ракети серії "Луна", запущеної 4 жовтня 1959 р., полягало в тому, що вперше встановлена в ній апаратура сфотографувала і передала на Землю зображення зворотної сторони Місяця, якої ніколи не видно із Землі. Вперше вивчення іншого небесного тіла здійснювали не спостереженням із Землі, а безпосередньо з космічного простору поблизу цього тіла. Астрономи отримали унікальну фотографію зворотної сторони Місяця, за якою змогли скласти атлас місячних гір і "морів". Назви, присвоєні відкритим гірським утворенням і рівнинам, навічно утвердили славу першовідкривачів, що послали чудовий автоматичний пристрій – прообраз майбутніх космічних обсерваторій.

Американським ученим після багатьох невдалих спроб так само вдалося отримати серію знімків поверхні Місяця. Ракета серії "Рейнджер" мчалася назустріч і безперервно вела телепередачу зображень місячної поверхні. Фотографії зображень, переданих з мінімальних відстаней (перш ніж космічний апарат розбився

об поверхню Місяця), давали змогу розрізняти деталі величиною близько 50 м.

На початку 60-х років були запущені перші серії експериментальних метеорологічних супутників, на яких встановили фотографічні і телевізійні камери для знімання Землі, дослідження атмосфери і найближчого до Землі космічного простору. До таких метеорологічних супутників належать "Тайрос", "Німбус", "ЕССА", "СМС", "НОАА" (США), "Метеор" (СРСР). За допомогою своїх метеорологічних супутників американцям вдалося завчасно попередити населення про наближення декількох тайфунів – сильних руйнівних ураганів, що дуже часто проносяться над Америкою.

Добре оволодівши технікою запуску автоматичних апаратів, радянські та американські вчені розпочали створення космічного корабля для польотів людини.

Десятки невирішених питань стояли перед наукою. Треба було створити потужніші ракети-носії для виведення на орбіту космічних кораблів, у декілька разів важчих, ніж найважчі штучні супутники, запущені раніше. Потрібно було сконструювати і побудувати літальні апарати, що не тільки гарантують безпеку космонавта на всіх етапах польоту, але і створюють необхідні умови для його життя і роботи. Необхідно було розробити цілий комплекс спеціального тренування, який би дав змогу організму майбутніх космонавтів заздалегідь пристосуватися до життя і роботи в умовах перевантажень і невагомості. Треба було вирішити багато інших питань. Незважаючи на всю складність цієї проблеми, головний конструктор радянських ракетно-космічних систем, виходець з України, академік Сергій Павлович Корольов блискуче її вирішив.

## 1.3. Від космічних кораблів до орбітальних станцій

Після низки пробних запусків, коли місця в кабіні супутника займали різні живі істоти – від грибків і бактерій до відомих всьому світу собак Білки і Стрілки – конструкція космічного корабля зі всіма його складними системами виведення на орбіту,

стабілізації польоту і зворотного спуску на Землю, була повністю відпрацьована.

В історичний день *12 квітня 1961 р.* вийшов в космос корабель "Восток" з першим в історії людства льотчиком-космонавтом на борту *Юрієм Олексійовичем Гагаріним* (рис. 1.2). Облетівши один раз земну кулю, він через 1 год. 48 хв. успішно приземлився в заданому районі Радянського Союзу.

Рис. 1.2. Перший космонавт Юрій Гагарін.

Під час виведення корабля на орбіту ракета розвинула потужність в 20 млн. кінських сил. Орбіта "Востока" була еліпсом, апогей якої мав висоту 327 км, а перигей – 181 км. Вибрали орбіту, нахилену до площини земного екватора під кутом 65°. "Восток" мав вагу 4 725 кг.

З кораблем, запущеним з космодрому Байконур на космічну орбіту, підтримували постійний радіозв'язок. Радіохвилі доносили голос Юрія Гагаріна, його зображення, передавали інформацію про характер руху корабля, давали змогу прогнозувати його подальший політ. Гагарін вів спостереження суші й океанів, хмарності і зоряного неба, записував свої враження в бортовий журнал і передавав їх по радіо. Ю. Гагарін захоплювався красою Землі, що відкривалася з космічних висот. На відчутті неповторної

краси космічного "обличчя Землі" наголошували згодом майже всі наступні космонавти.

На початку серпня 1961 р. другий льотчик-космонавт Герман Титов на кораблі "Восток-2" багато разів облетів нашу планету. Він виконав велику програму наукових спостережень Землі з космосу і вперше зняв на кіноплівку космічні пейзажі. "Восток-2" зробив 17,5 обертів навколо Землі і пробув у космічному польоті 25 год. 18 хв.

У серпні 1962 р. на кораблях "Восток-3" і "Восток-4" Андріан Ніколаєв і Павло Попович (уродженець України) зробили перший груповий політ. Під час польоту вони переговорювалися по радіо один з одним. В цьому польоті започатковано космотелебачення – безпосередня телепередача з кабін космонавтів на Землю. "Восток-3" зробив понад 64 оберти навколо Землі і перебував в космічному польоті 95 год. "Восток-4" зробив понад 48 обертів і пробув у космічному польоті 71 год. Ці польоти довели, що розроблена ученими система підготовки космонавтів дала їм змогу виробити такі фізичні якості, які забезпечують нормальну життєдіяльність і повну працездатність в умовах тривалого космічного польоту. У цьому полягав головний підсумок польотів кораблів "Восток-3", "Восток-4".

У червні 1963 р. на "Востоку-5" і "Востоку-6" вийшли в космос Валерій Биковський і Валентина Терешкова – перша в світі жінка-космонавт. Політ Биковського тривав близько п'яти діб – на ті часи рекордна тривалість перебування людини в стані невагомості.

Порівняно з досягненнями радянських космонавтів більш ніж скромними здаються перші балістичні польоти американських космонавтів Шепарда і Гріссома, один з яких трохи не закінчився трагічно. Запуск першої ракети-капсули "Меркурій-3" відбувся 5 травня *1961 р. з Аланом Шепардом* на борту. Капсула "Меркурій" – мініатюрний одномісний космічний корабель. Форма капсули – зрізаний конус з діаметром основи 1,8 м і завдовжки 2,9 м. Перша з капсул серії "Меркурій" мала вагу 1,4 т. Капсула з Шепардом не зробила жодного оберту навколо Землі. Вона злетіла по параболі, піднявшись угору на 184 км. Політ продовжувався всього 10 хв. Капсула приводнилася за 486 км від місця запуску. За повідомленням кореспондента газети "Нью-Йорк Таймс" десятихвилинний стрибок Аллана Шепарда був здійснений за допомогою ракети,

потужність якої становила "всього лише одну десяту потужності радянської ракети, а вага капсули складала лише одну п'яту ваги кабіни корабля "Восток"". Хоча повноцінних обертів над Землею не було здійснено, Шепарда вважають першим американським астронавтом.

У липні 1961 р. астронавт Гріссом зробив другий балістичний політ.

Тільки 20 лютого *1962* р. після пробного запуску двотонної кабіни з роботом і мавпами американцям вдалося виконати перший космічний політ. Його реалізував астронавт *Джон Гленн*. Цей політ був здійснений на космічному кораблі "Меркурій-6" вагою близько 1,5 т (для порівняння, таку ж вагу мав радянський автомобіль ГАЗ М-20 "Побєда"). Джон Гленн зробив на своєму кораблі три оберти навколо Землі, піднімаючись в апогеї до 257 км, і опустився в Атлантичний океан. Його корабель мав ілюмінатор, через який космонавт спостерігав і фотографував Землю. Політ Гленна протікав не зовсім вдало, в час польоту виявилися несправності в системах автоматичного управління космічним кораблем, і після першого оберта Гленну довелося перейти на ручне управління. Відмовила також на деякий час система охолоджування, і в кабіні сильно підвищилася температура. На другому і третьому обертах політ продовжувався тільки завдяки ентузіазму, витримці і мужності космонавта.

Другий космічний день Америки, 24 травня 1962 р., був затьмарений великими хвилюваннями за долю другого космонавта – Малькольма Скотта Карпентера. Політ Карпентера був ще драматичнішим, ніж політ Джона Гленна. Неполадки виявилися знову у системі управління і терморегулювання кабіни та скафандра. Космонавт приводнився в Атлантичному океані за 350 км від передбачуваного району посадки корабля. 20 морських кораблів і 70 літаків та вертольотів протягом 1 год. розшукували відважного космонавта. Одна шведська газета назвала цей політ космічною драмою між життям і смертю.

Третій космічний день Америки був 3 жовтня 1962 р. Цього дня в США з мису Кеннеді на півострові Флоріда стартував двотонний космічний корабель-супутник "Сигма-7", пілотований льотчиком-космонавтом Уолтером Ширрой. Космічний корабель зробив шість обертів навколо Землі і вдало приводнився в цент-

ральній частині Тихого океану. Несправності системи регулювання температури всередині скафандра, які перешкоджали і цьому польоту, вдалося швидко виправити безпосередньо на орбіті, і подальший політ продовжувався успішно.

Разом з польотами пілотованих космічних кораблів в СРСР і США були здійснені і пробні *запуски ракет до планет* сонячної системи. 12 лютого 1961 р. з борту штучного супутника Землі у бік Венери стартувала радянська автоматична міжпланетна станція "Венера". Услід за нею у 1962 р. до Венери була запущена американська автоматична станція "Марінер-2".

1 листопада 1962 р. у бік Марса стартувала радянська космічна ракета "Марс-1". Її орбіта була довшою порівняно з орбітами всіх попередніх польотів космічних апаратів. Витягуючись по еліпсу від Землі, вона торкнулася орбіти Марса. Сім з половиною місяців тривав політ тільки до зустрічі з Марсом: 500 млн. км пройшов за цей час "Марс-1". На значних відстанях від Землі він зафіксував значне скорочення числа реєстрованих мікрометеорів. Вони, як виявилося, концентруються поблизу Землі, близько 40 тис. км від її поверхні.

2 квітня 1964 р. відправлена в глибини космосу чергова радянська автоматична станція "Зонд-1". Її завданням було прозондувати багато мільйонів кілометрів навколосонячного простору і передати на Землю наукову інформацію.

За трирічний період космічної історії відбулися також успіхи в конструюванні радянських пілотованих кораблів. На зміну першим космічним кораблям "Восток" прийшли нові кораблі серії "Восход" (рис. 1.3). Вони були багатомісними. В жовтні 1964 року, В. Комаров, К. Феоктістов і Б. Єгоров на "Восході-1" вперше під час польоту перебували в кабіні без скафандрів – це був перший політ екіпажа з трьох чоловік. Нова система телебачення передавала з борту корабля не тільки зображення космонавтів, а й картину зовнішніх спостережень. Окрім спускного апарату і відсіку з приладами, "Восход-2" мав шлюз для виходу у відкритий космос. Такий вихід вперше у світі виконав Олексій Леонов у березні 1965 р. Зазначимо, що для перевірки всіх нововведень за місяць до старту пілотованих кораблів, запускали безпілотні кораблі серії "Космос", іноді зі собаками на борту.

У 1963 р. в США були введені в експлуатацію нові кораблі "Джеміні" ("Близнюки"). Формою і оснащенням вони нагадува-

ли своїх попередників, але перевершували їх у розмірах. Діаметр основи корабля "Джеміні" 2,3 м, довжина 5,7 м. Кораблі цієї серії мали вагу близько 3,5 т.

Перший космічний політ на кораблі "Джеміні" здійснений у березні 1965 р., а в липні того ж року з корабля "Джеміні-4" астронавт Уайт зробив 20-хвилинний вихід у відкритий космос.

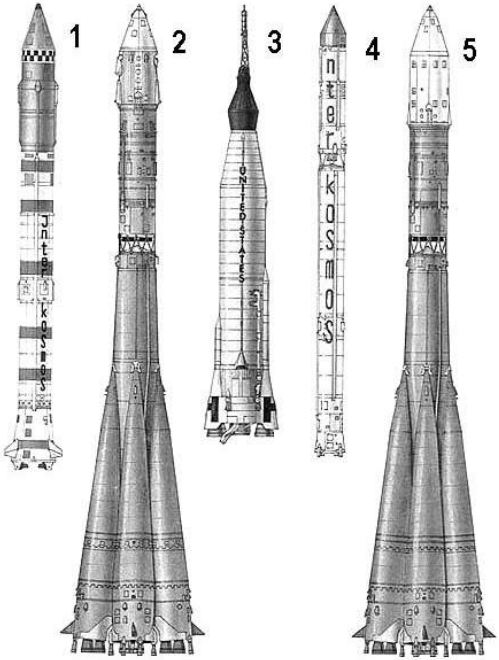



Рис. 1.3. Ракети-носії 60-х років:
*1* – С-1 "Космос" (1964 р., СРСР); *2* – "Восход" (1964 р., СРСР); 3 – "Меркурій" (1962 р., США); 4 – В-1 "Космос" (1962 р., СРСР); 5 – "Марс-Венера" (1962 р., СРСР).

Американці першими провели стикування кораблів у космосі. 16 березня 1966 р. астронавти Армстронг і Скотт зістикували кораблі "Джеміні-8", які здійснили шість обертів навколо Землі. На "Джеміні-11" в 1966 р. астронавти досягли рекордної висоти польоту – 1370 км.

У США у 1967 р. на зміну пілотованим кораблям "Джеміні" прийшли нові кораблі серії "Аполлон".

З кораблями "Аполлон" пов'язані найбільші успіхи американської космонавтики. Саме на них астронавти облетіли Місяць, а потім висадилися на його поверхню. Нагадаємо, що *першими відвідувачами Місяця* були астронавти *Ніл Армстронг і Базз Олдрін*, що ступили на її поверхню 21 липня *1969* р. Доставив їх туди космічний корабель "Аполлон-11".

В той самий час у Радянському Союзі кораблі "Восток" і "Восход" підготували основу для програми "Союз". Кораблі серії "Союз" – дуже складні і багатоцільові інженерні споруди. Вони

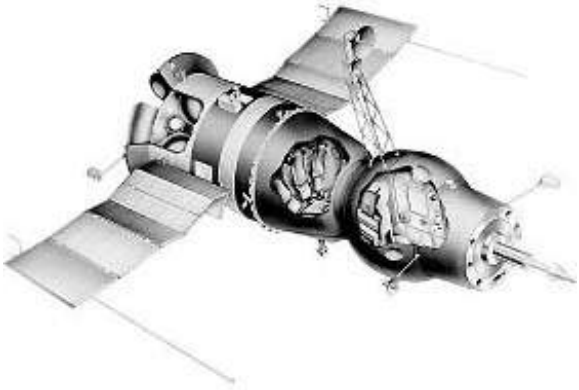
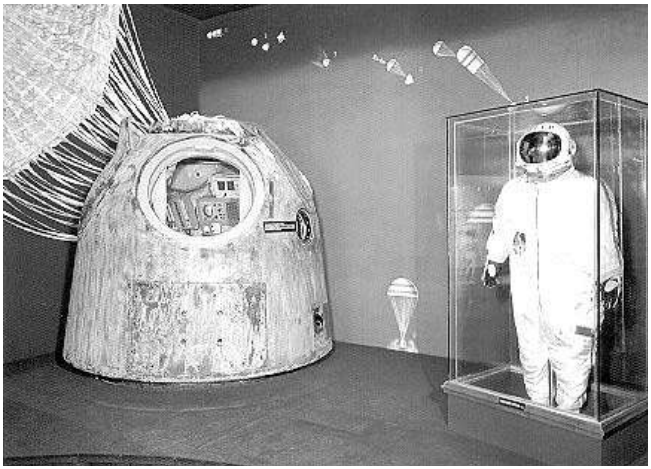


Рис. 1.4. Космічний корабель “Союз” (*а*), капсула приземлення і скафандр космонавта (*б*).

*а*



*б*

призначені для тривалих польотів, маневрування, зближення і стикування на орбітах як один з одним, так і з іншими апаратами, а також для виконання транспортних операцій з обслуговування орбітальних станцій – доставки на них екіпажів космонавтів і різних вантажів (рис. 1.4).

Найбільш яскрава відмінність цих кораблів від попередніх полягає в апараті, що спускається: у кораблів серії “Восток” і “Восход” він був кулястим, а у “Союзів” кабіна, в якій розташовуються космонавти, формою нагадує автомобільну фару – зрізану від основи півкулю. На відміну від кулі така форма при польоті в

атмосфері забезпечує аеродинамічну якість: створює, як крила літака, підйомну силу. Ця особливість є важливою тому, що в процесі спуску на Землю (зокрема під час проходження через атмосферу Землі) знижуються перевантаження в 2–2,5 раза.

Програму "Союз" почали виконувати з листопада 1966 р. Спочатку провели три безпілотних запуски, які виявились невдалими. Після конструкційних доопрацювань, у квітні 1967 р. відбувся перший пілотний пуск "Союз-1". Проте він також завершився трагічно – космонавт В. Комаров загинув. Кораблі удосконалювали і вони надалі здійснили багато видатних польотів – перше автоматичне стикування в космосі, груповий політ трьох кораблів зразу і довготривалий політ.

У січні *1969* р. відбулася найважливіша подія у світовій історії космонавтики: космічні кораблі "Союз-4" і "Союз-5" зістикувалися в космосі, утворивши першу експериментальну орбітальну станцію. Це дало початок принципово новій схемі перебування і дослідження космосу. В екіпаж станції входили: У. Шаталов, О. Єлісєєв від "Союзу-4" і Б. Волинов, Є. Хрунов від "Союзу-5". Станція оберталася навколо Землі майже по круговій орбіті на середній висоті 215 км. Після стикування Єлісєєв і Хрунов у скафандрах з автономними системами життєзабезпечення зробили вихід у відкритий космос і вперше перейшли з одного корабля в іншій. У польоті кораблів "Союз" і на утвореній ними орбітальній станції постійно вели різні наукові спостереження, що відбувається і під час кожного космічного польоту. Чотири з половиною години працювала в космосі перша орбітальна станція, після чого космічні кораблі розстиковували і їхні капсули повернулися на Землю.

У 1970 р. О. Ніколаєв і В. Севастьянов на кораблі "Союз-9" здійснили рекордний за тривалістю 18-добовий політ навколо Землі. На ті часи це був великий термін, враховуючи те, що техніка була не пристосована на належному рівні для таких польотів. Цей політ довів, що перебування в космосі (якщо застосовувати засоби для зміцнення м'язів, оскільки м'язи в невагомості розслабляються і втрачають свою пружність) може бути достатньо тривалим.

У 80-ті рр. кораблі серії "Союз" почали модифікувати. З'явився "Союз-Т" (транспортний), який мав удосконалений спускний апарат, і сонячні батареї, відсутні в кількох останніх моделях.

"Союз-Т" літав до орбітальних станцій "Салют-6" і "Салют-7". Подальша модифікація корабля цього сімейства – "Союз-ТМ" – мала удосконалену систему двигунів, покращену парашутну систему, систему зближення та ін. Кораблі "Союз-ТМ" почали свої польоти у 1986 р. до станції "Мир" і завершили у 2002 р. польотами до Міжнародної космічної станції (МКС). З того часу і до сьогодні для польотів в космос Росія використовує кораблі "Союз-ТМА" (А – антропометричний). Ці кораблі більш пристосовані для польотів до МКС, мають сучасне електронне обладнання, покращену теплоізоляцію. Вони розраховані на екіпаж з трьох осіб і є, за програмою МКС, єдиними кораблями, які у випадку надзвичайної ситуації, виконали б аварійні польоти з доставки космонавтів на Землю.

Окрім колишнього Радянського Союзу, а зараз Росії, та США, запуски космічних кораблів виконує Китай. Серія китайських космічних кораблів називається "Шеньчжоу". Роботи зі створення корабля почались у 1992 р., перший політ безпілотного корабля – 1999 р. На сьогодні провели сім запусків, останній з яких, у вересні 2008 р. На борту корабля знаходилася команда із трьох тайконавтів, які під час польоту здійснили вихід у відкритий космос. У 2010 р. Китай планує створити у навколоземному просторі невелику орбітальну станцію, яка б складалась з двох модулів (двох кораблів "Шеньчжоу") і яка б у 2011 р. прийняла перший екіпаж.

## 1.4. Історія космічних станцій багаторазового використання

З початку 70-х років в історії космічних досліджень настає новий етап, пов'язаний зі створенням особливих спеціально обладнаних довготривалих орбітальних станцій.

У квітні *1971* р. в космосі з'явилася перша у світі радянська довготривала *орбітальна станція "Салют"* (рис. 1.5). Сама по собі ця станція не могла ні злетіти, ні зробити посадку. Її виводили на навколоземну орбіту пілотовані кораблі типу "Союз", як величезний супутник. Проте, на відміну від звичайних супутників,

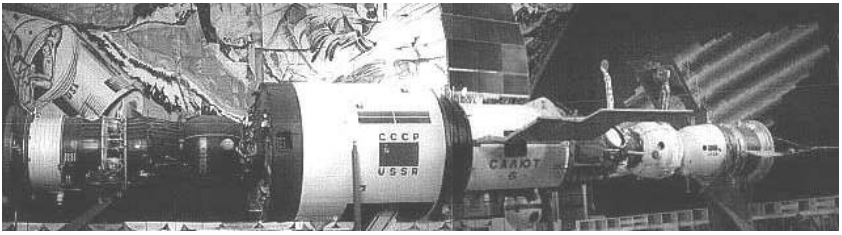



Рис. 1.5. Довготривала орбітальна станція "Салют-6" на Виставці народного господарства в Москві.

станція "Салют" могла працювати не тільки в автоматичному, а й у пілотованому режимі.

Загальна маса системи "Салют"–"Союз" становила 25,6 т. Зокрема, на частку станції "Салют" припадало майже 19 т. Вже на першому з "Салютів" наукові прилади мали вагу 1,2 т, а на подальших станціях цей вантаж був ще більший. У зістикованому стані система "Салют"–"Союз" досягала в довжину 23 м, причому на орбітальний відсік (тобто саме станцію) припадала частка 16 м. У найширшій своїй частині "Салют" мав поперечник 4,15 м, а при розкритих сонячних батареях – 11 м. Площа сонячних батарей – 63 м$^2$. Особливо вражав загальний об'єм внутрішніх приміщень станції – близько 100 м$^3$.

Така станція могла функціонувати на орбіті тривалий час. Чим довше працював на станції її екіпаж, тим більше він витрачав кисню, палива для двигунів та інших корисних матеріалів. Наставав момент, коли витрати потрібно поновити. На "Салюті-6" це було зроблено за допомогою автоматичних вантажних кораблів "Прогрес". З 1979 р. використовували транспортні кораблі "Союз-Т".

Зовні "Прогрес" схожий на "Союз", основа якого й була використана під час конструювання вантажного корабля. Проте на "Прогресах", на відміну від "Союзів", не було предметів життєзабезпечення космонавтів. Основний відсік цього корабля – вантажний, що має об'єм 6,6 м$^3$. У ньому можна розмістити 1300 кг сухих вантажів і близько 1 т палива для двигунів. Вантажний корабель складали різні автомати, які за радіокомандою із Землі здійснювали зближення зі станцією "Салют" і стикування з нею. Зокрема, у 1977 р. на космічній станції "Салют-6" створили споруду з трьох апаратів – двох кораблів "Союз" і станції, розміщеної між

ними. У пізніші роки зі станцією сполучали кораблі "Союз" і "Прогрес".

"Прогреси" доставляли на "Салют-6" їжу для космонавтів, паливо для двигунів, запаси повітря і багато чого іншого, чого потребували космонавти. Мешканці станції вантажили його всім непотрібним і відпрацьованим, що накопичилося на станції. Виконавши роль сміттєочищувача, "Прогрес" відстиковувався від "Салюту-6" і за допомогою своїх бортових двигунів прямував до Землі. За програмою, залишки корабля, що не згоріли в атмосфері, затоплювали у віддалених районах Тихого океану.

З радянською орбітальною станцією "Салют-6" пов'язані й інші визначні події космічної історії 70-х років. Зокрема, 17 червня 1978 р. корабель "Союз-29" з космонавтами В.В. Коваленком і О.С. Іванченковим на борту пристикувався до тимчасово порожнього "Салюту-6". Почався героїчний, тривалий космічний орбітальний політ, який продовжувався 140 діб. Для забезпечення нормальної роботи космонавтів до орбітального комплексу "Союз-29"–"Салют-6" були послані послідовно три вантажні кораблі: "Прогрес-2", "Прогрес-3", "Прогрес-4". Вони доставили на комплекс паливо, апаратуру, витратні матеріали і все необхідне для нормальної життєдіяльності космонавтів. Без вантажних космічних кораблів тривалий 140-добовий політ був би неможливий. Проте і їхній рекорд незабаром був перевершений. Космонавти В. Ляхов і В. Рюмін в 1979 р. успішно пропрацювали на "Салюті-6" майже півроку. Кораблі "Прогрес" продовжують служити космосу і в теперішній час, доставляючи вантажі на російський сегмент Міжнародної космічної станції.

Перша американська *космічна станція "Скайлеб"* ("Небесна лабораторія") з'явилася на навколоземній орбіті в травні *1973* р. (рис. 1.6). "Скайлеб" – це ракетний блок останнього ступеня ракети "Сатурн-5", яка виводила на орбіту перші місячні експедиції. У робочому стані до станції "Скайлеб" пристиковували корабель "Аполон".

Основний циліндровий блок станції з діаметром 6,6 м мав довжину 14,6 м. Він розділений на два відсіки – побутовий і лабораторний. Лабораторний відсік удвічі більший від побутового. У нім були розміщені прилади для різних експериментів. Електроенергією станцію забезпечували сонячні батареї і бортові аку-

Рис. 1.6. Орбітальна станція "Skajlab".

мулятори. Варто зазначити, що на "Скайлебі" не було бортових двигунів. Маневри здійснювали лише за допомогою пристикованого до станції "Аполона".

На станції працювали позмінно три екіпажі. Вони провели безліч важливих експериментів та отримали нові цінні дані про Землю і космос. Останній з них пробув на орбіті 84 дні. Після цього станція була законсервована. Станція увійшла до атмосфери Землі. Незгорілі її частини 11 липня 1979 р. впали в Індійський океан і на південно-західну частину Австралії.

Період 70-х років характеризують масові експериментальні космічні дослідження в галузі астрономії, метеорології, океанології, геології, географії. Зростає банк космічної інформації. Кількість оригінальних негативів космічних знімків вже наприкінці 1970-х рр. становили багато мільйонів і продовжували інтенсивно зростати. Кожен космічний знімок неповторюваний, не дублює інших і несе унікальну інформацію, яка залежить від часу зні-

мання, освітленості, сезонних і погодних умов, типу знімальної апаратури, спектрального діапазону, в якому проводять знімання, орієнтації оптичних осей фотоаппаратури у відношенні до Землі, типу і якості фотоматеріалів, масштабу отримуваних космофотонегативів і знімків, що виготовляють з них (іноді зі значним збільшенням).

Набули поширення також космічні дослідження природних ресурсів Землі. З цією метою використовували супутники: радянські – "Метеор"–"Природа", "Космос", американські "Лендсат" ("Landsat"). Інформацію з них застосовували для вивчення ґрунтів, стану рослинності і посівів, землевпорядних робіт, проявів небезпечних екзогенних процесів, моніторингу надзвичайних ситуацій тощо.

До кінця 1981 р. на навколоземні орбіти виведено більше 2 500 штучних супутників Землі (ШСЗ), а на міжпланетні орбіти – понад 130 об'єктів. На початок 1982 р. на геоцентричних орбітах перебувало понад тисячу супутників, зокрема, 621 радянський, 426 американських, 21 японський, 10 французьких та ін. На нічному небі можна побачити ці яскраві крапки, що закономірно переміщаються, кожна з яких рухається по своїй орбіті. Деякі з ШСЗ існують недовго – тижні, місяці; деякі – роки.

У 80-ті роки почало розвиватися міжнародне співробітництво з комплексного вивчення космосу. Воно ґрунтувалося на низці міжнародних космічних програм, серед яких були багатосторонні програми десяти соціалістичних країн "Інтеркосмос", а також двосторонні космічні програми СРСР – Франція, СРСР – США, СРСР – Індія, СРСР – Швеція. У рамках робіт за програмою "Інтеркосмос" до початку 1985 р. запущено більше двадцяти супутників серії "Інтеркосмос", одинадцять ракет "Вертикаль", десятки метеорологічних ракет. На радянських орбітальних станціях "Салют–6", "Салют–7" вели дослідження міжнародні екіпажі.

Важливою подією космічної історії 80-х років було створення космічних кораблів багаторазового використання типу *спейс шатл* (*space shuttle*, від англ. – "космічний човник"). Шатл запускають у космос без участі ракети-носія, але за допомогою стартових прискорювачів. У космосі він здійснює самостійні маневри на орбіті, як космічний корабель, і повертається на Землю, як літак (рис. 1.7). Йдеться про те, що шатли снуватимуть, як човники, між навколоземною орбітою і Землею, доставляючи корисні вантажі в обох

*а*

*б*

Рис. 1.7. Спейс шатл: *а* – політ, *б* – приземлення [120].

напрямах. Під час розроблення передбачали, що кожен із шатлів повинен був до 100 разів стартувати в космос. На практиці ж їх використовують значно менше. Сьогодні найбільше польотів зробив шатл "Дискавері". Експлуатація шатлів, за повідомленням NASA, буде завершена у 2011 р.

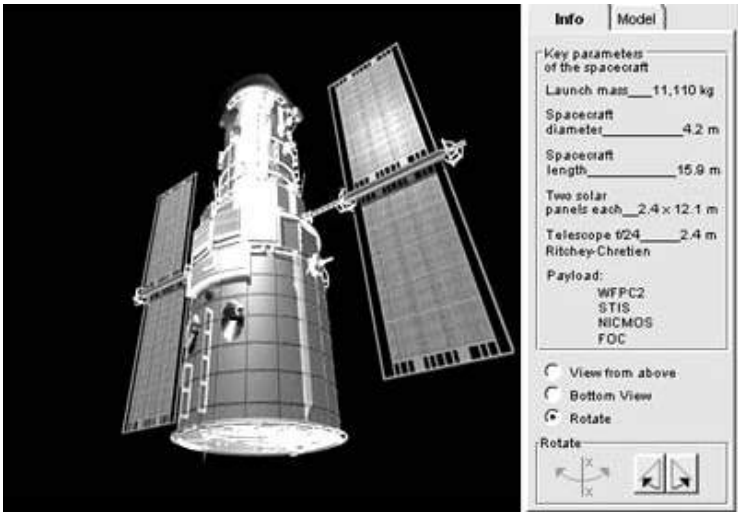
Космічні кораблі "космічний човник" створені у США в рамках програми "Космічна транспортна система" ("Space Transportation

System" STS, це скорочення разом з порядковим номером застосовують для позначення польотів "Спейс Шатл", наприклад STS–114), яку розробляють з 1971 року.

Шатл "Колумбія" ("Columbia") був першим багаторазовим орбітальним апаратом. Його будівництво почалося в 1975 р. і у 1979 р. передали Космічному центру НАСА імені Кеннеді (NASA – National Aeronautic and Space Agency). Човник названий на честь першого американського корабля, який зробив кругосвітню подорож. У НАСА "Колумбія" має позначення OV–102 (Orbiter Vehicle 102). *Перший політ* шатл здійснив 12 квітня *1981* р. Видатні польоти – 28.11.1983 р., коли "Колумбія" доставив на орбіту керовану лабораторію "Спейслеб-1" і 33.07.1999 р., коли вивів у космос рентгенівський телескоп "Чандра". "Колумбія" першою з човників понад 50 разів була піддана різним модифікаціям. Шатл "Колумбія" загинув 1 лютого 2003 р. під час входу в атмосферу Землі перед посадкою. Це була 28-ма космічна подорож "Колумбії".

Другий космічний човник "Челленджер" ("Challenger") почали будувати в 1975 р., а стартував він 4 квітня 1983 р. Його назвали як морське судно, яке досліджувало Світовий океан у 1870-ті роки. У НАСА "Челленджер" має позначення OV–099. "Челленджер" вибухнув під час свого десятого запуску 28 січня 1986 р. Всі сім членів екіпажу загинули.

Третій шатл "Дискавері" ("Discovery") почали будувати 1979 р., передали НАСА в листопаді 1982 р., а його старт відбувся 30.08.1984 р. Він названий на честь одного з двох кораблів мандрівника і першовідкривача XVIII ст. капітана Джеймса Кука. Таке ж ім'я ("Дискавері") носило одне із суден Генрі Хадсона, який у XVII ст. досліджував Гудзонову затоку. Ще два судна "Дискавері" побудовало Британське Королівське Географічне Товариство для дослідження Північного полюсу й Антарктики в 1875 і 1901 роках. У НАСА "Дискавері" має позначення OV–103. Видатні польоти "Дискавері" провів 25.04.1990 р., коли вивів у космос телескоп "Хаббл" для спостереження за найближчими галактиками і ближнім всесвітом (рис. 1.8); 29.10.1998 р. на цьому шатлі здійснив ще одну космічну подорож один із перших американських астронавтів Джон Гленн; 27.05.1999 р. за його участю відбулось перше стикування з Міжнародною космічною станцією (МКС). На теперішній час "Дискавері" є найстарішим човником і зробив 36 польотів.




*а*

*б*

Рис. 1.8. Космічний телескоп "Хаббл" (*а*) та його фотографія ділянки Всесвіту (*б*). Яскраві плями – галактики, чорне кільце – "темна матерія", сіре кільце – міжгалактичний газ.

Четвертий шатл "Атлантіс" ("Atlantis") здійснив перший політ 3 жовтня 1985 р. Названий на честь американського дослідницького судна. Визначними польотами були: 4 жовтня 1989 р., коли він запустив автоматичну міжпланетну станцію (АМС) "Магеллан"

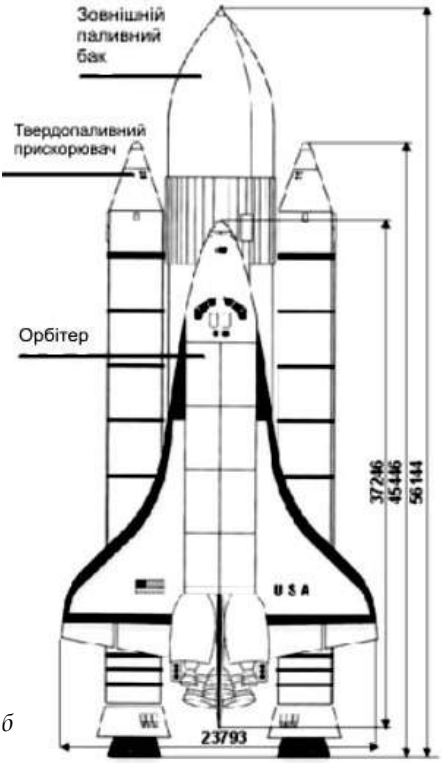
для польоту до Венери; 18 жовтня 1989 р. вивів на орбіту АМС "Галілео" для польоту до Юпітера; 27.06.1996 р. "Атлантіс" зістикувався з МКС "Мир". Як пам'ять про цю подію в космічному центрі НАСА присвячене спеціальне відділення музею "Історії космонавтики". Всього "Атлантіс" виконав більше 30 польотів.

П'ятий шатл "Індевор" ("Endeavour") був побудований замість загиблого "Челленджера" і прийнятий в експлуатацію в травні 1991 р. Перший політ здійснив 7 травня 1992 р. Шатл "Індевор" має назву одного із суден Джеймса Кука. Це судно використовували в астрономічних спостереженнях XVIII ст., які точно з'ясували відстань від Землі до Сонця. У НАСА "Індевор" має позначення OV–105. 4.12.1998 р. він вивів на орбіту другий модуль МКС "Юніті". У 2000 р. з його борта відбулося сканування земної поверхні з метою створення топографічної карти Землі. 11.03.2008 р. доставив на МКС першу секцію японського науково-дослідного модуля "Кібо" і канадську руку-маніпулятор "Декстр". "Кібо" – це найбільший житловий модуль станції з власною шлюзовою камерою і маніпулятором для проведення експериментів за межами МКС. "Індевор" найсучасніший з американських космічних човників, і багато нововведень, вперше випробуваних на нім, були пізніше використані під час модернізації решти шатлів. Нині він зробив більше 20 польотів. Зазначимо, що до "Колумбії" був побудований ще один шатл "Ентерпрайз" ("Enterprise"), який наприкінці 70-х років використовували тільки як тестовий апарат для відробітку методів посадки і який не літав у космос.

Шатл складається з трьох основних компонентів: орбітальний апарат (Орбітер, Orbiter), який виводять на навколоземну орбіту і який є, власне космічним кораблем; великий зовнішній паливний бак для головних двигунів; і два твердопаливних ракетних прискорювачі, які працюють протягом двох хвилин після старту (рис. 1.9). Після виходу в космос орбітер самостійно повертається на Землю і здійснює посадку як літак на злітно-посадову смугу.

При довжині 37 м він має розмах крил 23,8 м. Твердопаливні прискорювачі приводнюються на парашутах, потім їх повторно використовують. Зовнішній паливний бак згорає в атмосфері. Коли корабель знижується, на висоті приблизно 63 км, обшивка шатла нагрівається до 2000°С. Для попередження перегрівання апарати мають потужне теплозахисне покриття, що складається

*а*




*б*

Рис. 1.9. Космічний корабель багаторазового використання "Спейс шатл": *а* – корабель на стартовій платформі [120]; *б* – схема космічного човника.

з десятків тисяч пластин розміром 15х15 см, на які нанесений тонкий шар кераміки. Вони різної товщини залежно від величини теплового навантаження.

Орбітер шатла розрахований приблизно на двотижневе перебування на орбіті. Найтривалішу космічну подорож у 1996 р. зробив шатл "Колумбія" – 17 діб 15 год. 53 хв. Звичайні польоти шатлів продовжуються від 5 до 16 діб. Найменший екіпаж шатлу складається з двох астронавтів – командира і пілота, найбільший – з восьми. Зазвичай екіпаж складає від п'яти до семи астронавтів. Орбіта шатлів розташована на висоті приблизно в межах від 185 км (115 миль) до 643 км (400 миль).

Кораблі "Спейс шатл" призначені для виведення вантажів

на сонячно-синхронні орбіти, проведення наукових досліджень, обслуговування орбітальних космічних апаратів (монтажні і ремонтні роботи). Шатл має найбільше корисне навантаження з усіх космічних апаратів, які існують сьогодні. У першому польоті стартова маса "Спейс шатл" становила 2022 т, маса пілотованого орбітального корабля під час виведення на орбіту – 94,8 т, під час посадки – 89,1 т. Човник виводить на орбіту з нахилом 28,5° корисний вантаж масою 29,5 т. На сонячно-синхронну орбіту він транспортує туди і назад 14,5 т. З 1981 р. за допомогою шатлів було доставлено на орбіту більш ніж 1,36 млн. кг (3 мільйони фунтів) корисних вантажів. Більш ніж 600 астронавтів брали участь у польотах шатлів. Загалом шатли зробили біля 125 польотів.

На шатлах "Колумбія", "Дискавері" та "Індевор" були реалізовані чотири експедиції з обслуговування телескопа "Хаббл". Ці місії неможливо було виконати іншими космічними апаратами.

У 90-ті роки шатли брали участь в сумісній російсько-американській програмі "Спейс шатл"–"Мир". Було здійснено дев'ять стикувань зі станцією "Мир". Протягом 20-ти років, коли шатли були в експлуатації, вони постійно розвивалися і модифікувалися. Були зроблені більше тисячі значних і незначних модифікацій до їхнього початкового проекту. Шатли відіграють дуже важливу роль у здійсненні проекту зі створення Міжнародної космічної станції. Вони доставляють на станцію чергові науково-дослідні модулі, виконують заміну екіпажу.

Після останньої катастрофи "Колумбії" в експлуатації залишаються три шатли "Дискавері", "Атлантіс" та "Індевор". Вони повинні забезпечити добудову МКС до 2010 р. Передбачають, що у цьому році закінчиться й експлуатація шатлів. Їм на зміну прийдуть кораблі "Оріон", які в системі НАСА позначають CEV (Crew Exploration Vehicle) (пілотований дослідницький корабель). Планують використовувати цей корабель як для польотів до МКС, так і для експедицій на Місяць і Марс.

У Радянському Союзі ще з 1976 р. велося розроблення багаторазового космічного корабля. Ним став ракетно-космічний комплекс *"Буран"*, успішні випробування якого відбулися на сім років пізніше, ніж перші старти шатлів, – 15 листопада *1988* р. на космодромі Байконур (нині – республіка Казахстан) (рис. 1.10). Після старту універсальної ракетно-космічної транспортної системи "Енергія" з

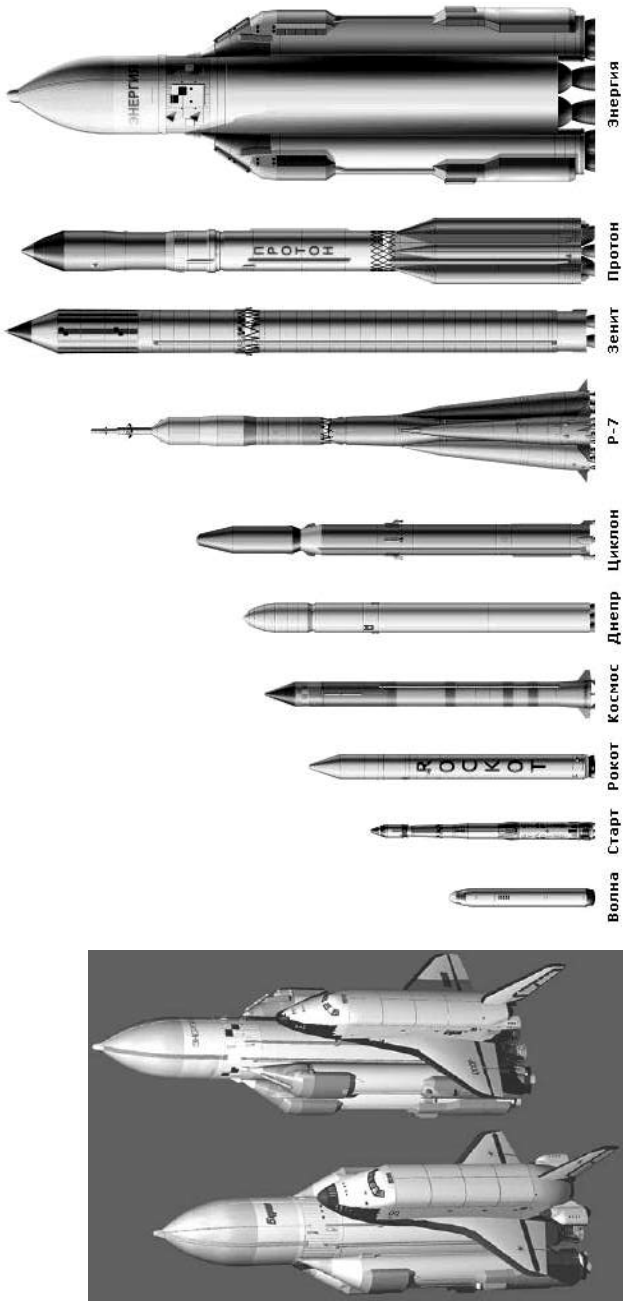



Рис. 1.10. Ракета-носій "Енергія":
*а* – з кораблем "Буран", *б* – у порівнянні зі всіма радянськими ракетоносіями.

кораблем "Буран" орбітальний корабель вийшов на розрахункову орбіту, зробив два оберти навколо Землі і приземлився в автоматичному режимі на посадову смугу, завдовжки близько 5 км. Це була перша і до цього дня єдина в історії космонавтики автоматична посадка космічного корабля багаторазового використання.

Корабель був розрахований на 100 польотів і міг виконувати польоти як в пілотованому, так і в безпілотному (автоматичному) варіанті. Максимальна кількість членів екіпажа десять: основний екіпаж – чотири особи і до шести осіб – космонавти-дослідники. При стартовій масі до 105 т, з яких 14 т припадає на паливо, корабель може виводити на орбіту корисний вантаж масою до 30 т і повертати з орбіти на Землю вантажі масою до 20 т. Розрахункова тривалість польоту 7–30 діб. Довжина "Бурану" 36,4 м, розмах крила близько 24 м, висота корабля, коли він стоїть на шасі, більше ніж 16 м. За аеродинамічною схемою корабель "Буран" є монопланом з низькорозташованим крилом, виконаний по схемі "безхвостка". Дуже важливою особливістю "Бурану" є його могутній тепловий захист, що забезпечує нормальні теплові умови для конструкції корабля при проходженні щільних шарів атмосфери під час посадки. Теплозахисне покриття складається з близько 39 тис. плиток, виготовлених з високою точністю із спеціальних матеріалів (кварцове волокно, високотемпературні органічні волокна, частково матеріал на основі вуглецю) по програмах, що враховують місце установки кожної плитки на корпусі. Бортовий комплекс управління складається більш ніж з п'ятдесяти систем, які управляються автоматично за програмами, закладеними в бортову обчислювальну машину.

Система "Енергія – Буран" випередила час, промисловість не була готова до її використання. Система, як і вся космонавтика, в 90-х роках піддалася необґрунтованій критиці. Загальний спад і розвал промисловості негативно позначився на цьому проекті. Фінансування космічних досліджень різко скорочувалося, а в 1992 р. Російське космічне агентство ухвалило рішення про припинення робіт і консервацію створеної системи.

Виконуючи міжурядову угоду про стикування корабля "Спейс шатл" зі станцією "Мир" у червні 1995 р., російські інженери використовували технічні матеріали зі стикування орбітального комплексу "Буран" із станцією "Мир", що значно скоротило

термін підготовки.

Що ж являла собою космічна станція "Мир"? Це був грандіозний проект з освоєння космосу у тодішньому Радянському Союзі. Початком створення станції вважають 1976 р., коли науково-виробниче об'єднання "Енергія" випустило Технічні пропозиції зі створення вдосконалених довготривалих орбітальних станцій. Пізніше об'єднання розробило ескізний проект, який передбачав використання систем станцій "Салют", а також і чотирьох бічних стикувальних агрегатів для стикування модулів на базі ракет "Союз". Запуск радянської космічної станції *"Мир"* відбувся *20 лютого 1986 р*.

Системи станції "Мир" були модернізовані порівняно зі станцією "Салют", обладнання якої застаріло: система управління на базі великої цифрової обчислювальної машини значно розширювала можливості станції і давала змогу перепрограмування із Землі, нова система зближення "Курс" не вимагала розворотів станції під час зближення; система енергоживлення мала значно збільшену потужність і регулювання рівня напруги у вузькому діапазоні; замість громіздких регенераторів атмосферного повітря встановили систему електролізу води ("Електрон") для постачання киснем і регенеровану систему поглинання вуглекислого газу ("Повітря"); система управління бортовим комплексом використовувала ЕОМ і сучасні алгоритми управління. Була введена радіосистема "Антарес" з гостронаправленою антеною для зв'язку через супутник–ретранслятор.

Новим було те, що окрім основного модуля типу "Салют", достиковували дослідницькі модулі, які виводила на орбіту ракета-носій "Протон". У програму станції "Мир" були введені модулі: для дооснащення станції – технологічний, для робіт за так званою програмою "Октант" – дослідження спектральних характеристик поверхні Землі і для дослідження ресурсів Землі. Згодом ці модулі названі відповідно "Квант–2", "Кристал", "Спектр", "Природа". Зазначимо, що через складність і трудомісткість деякі модулі не були виготовлені до початку старту станції, що не дало змоги використовувати повною мірою її можливості. Зокрема, третій з чотирьох модулів "Спектр" був запущений тільки на дев'ятий рік польоту станції. У повному комплекті маса станції перевищувала 120 т.

Космічна станція "Мир" була складним й унікальним техніч-

ним об'єктом XX ст. (рис. 1.11). Вона проіснувала в космосі понад 13 років і стала справжнім міжнародним космічним будинком і лабораторією.

На станції "Мир" були закладені не тільки матеріально-технічні ресурси, потенціал, унікальні результати, рекорди, колосальний досвід радянської і світової космонавтики в галузі пілотованих космічних польотів, тривале життя людей поза Землею (до 1,5 р.), постійний доступ в космос і присутність людини на навколоземній орбіті, гарантоване повернення на Землю. Це знання, формули, розрахунки, креслення, описи, випробування, значні витрати. Це методики і результати космічних експериментів, помилки, аварії,

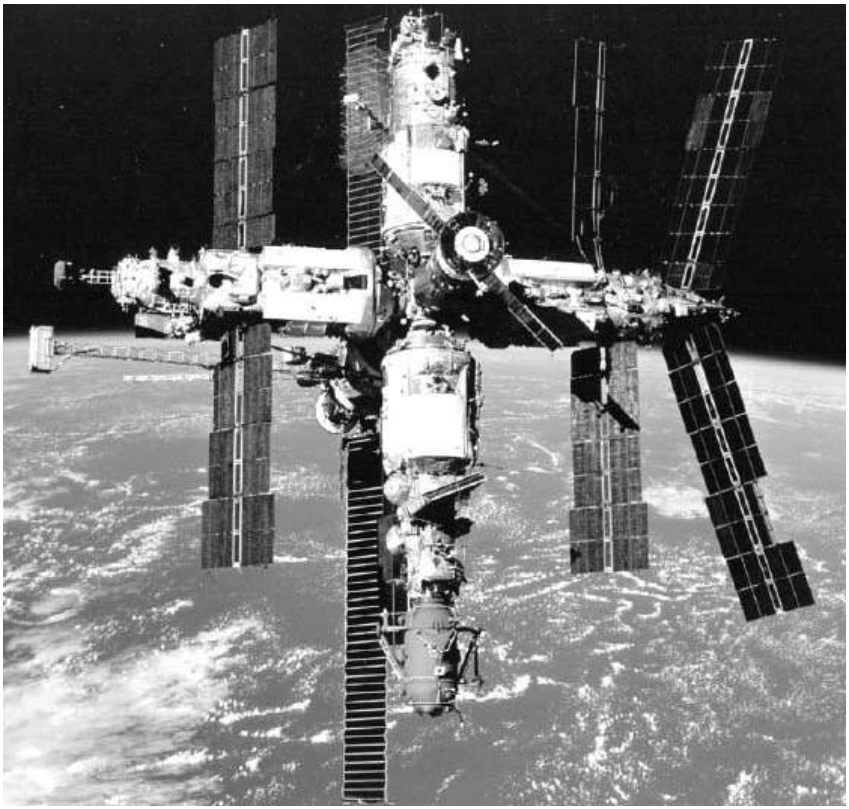


Рис. 1.11. Орбітальна станція "Мир" у 1998 р.
з чотирма стикувальними модулями і кораблем "Союз" в центрі [120].

розв'язані, нерозв'язані і нові проблеми.

Активну експлуатацію станції припинили в серпні 1999 р. після завершення космічної експедиції і повернення на Землю космонавтів (двох російських і одного французького). Надалі "Мир" здійснювала безпілотний політ до 2001 р., поки велися дискусії й обрахунки з ефективності заміни відпрацьованої апаратури, модернізації станції і її дисбактеризації, пов'язаної з наявністю величезної кількості мікроорганізмів на борту станції. Оптимальною та економічно вигідною виявили побудову нової Міжнародної космічної станції, розташованої на висоті 400–500 км над поверхнею Землі, а комплекс "Мир" вирішено затопити. 23 березня 2001 р. вона увійшла до щільних шарів атмосфери, де почала горіти і розламуватися на шматки. Уламки впали в північно-західній частині розрахункового району затоплення станції в південній частині Тихого океану. За час свого існування станція зробила 86 331 оберт навколо Землі; 15-річний політ "Миру" завершений.

Ідея зі створення стаціонарно існуючої на орбіті космічної станції, яка б могла вести дослідження і приймати змінні космічні екіпажі, продовжувала існувати в задумах як російських, так і американських конструкторів. Проте вартість створення й обслуговування такої станції для окремої країни була непомірною (зокрема, вартість запуску лише одного шатла в цінах на 80-ті рр. становила 240 млн. дол.). Тому вирішено було об'єднати зусилля. У 1992 р. Росія і США уклали угоду про співпрацю в дослідженні космосу. Виникла концепція об'єднання національних програм зі створення пілотованих комплексів. Змогу введення російських елементів у конфігурацію *Міжнародної космічної станції (МКС)* почали розглядати із серпня 1993 р. Проект став дійсно міжнародним після приєднання до нього Європейського космічного агентства (ЕКА), Канади та Японії. До 1996 р. визначилася конфігурація станції, що складається з двох сегментів: російського (переглянутий варіант проекту "Мир-2") й американського (за участю Канади, Японії, Італії, країн ЕКА і Бразилії). Назва МКС "Альфа" є неофіційною, оскільки офіційної згоди учасників щодо її назви не було досягнуто.

1998 р. у Вашингтоні були підписані міжурядові угоди, відповідно до яких російський і американський сегменти повністю використовують Російське космічне агентство і НАСА відповідно,

а європейський і японський модулі поділені між НАСА (46,7%), ЕКА (51%) і NASDA (Японія) (51%). На етапі збірки порівну поділили роботи на борту станції між російськими й американськими космонавтами. Під час експлуатації російський екіпаж з трьох осіб постійно працює на своєму сегменті, а час на американському сегменті для чотирьох астронавтів поділений: США – 76,6%, Японія – 12,8%, ЄКА – 8,3% і Канада – 2,3%. Російська сторона дістала доступ до використання 33% ресурсів МКС.

Спорудження *МКС* почалося в *листопаді 1998 р.*, коли ракета-носій "Протон" вивела на орбіту функціональний вантажний блок "Заря". У грудні 1998 р. шатл "Індевор" доставив сполучний блок "Нод-1". Далі був запущений російський модуль "Звезда" (2000 р.). Цим стартом почався другий етап збірки найбільшої споруди в космосі. У жовтні 2000 р. на станцію прибув перший екіпаж. Друга фаза складається з 17 запусків елементів станції, а для завершення збірки всієї МКС потрібно виконати 43 запуски (без урахування експлуатаційних польотів). Будівництво станції відбувається шляхом послідовного додавання до комплексу чергового модуля або блоку, який з'єднується з вже доставленим на орбіту. Після закінчення будівництва це буде величезна споруда масою 470 т, завдовжки 109 м і шириною 88,4 м. Загальний внутрішній об'єм станції після збірки становитиме 1217 м$^3$.

На сьогодні станція складається із чотирьох лабораторних модулів – російського "Звезда", американського "Дестіні", європейського "Коламбус", японського "Кібо" (рис. 1.12). Кілька модулів виконують різні функції – шлюзові ("Квест"), сполучні та електрокомутаторні ("Гармонія", "Юніті"), вантажні ("Заря"), життєзабезпечення ("Нод-3"). Крім модулів, МКС об'єднує порти причалювання, дистанційні маніпулятори для розвантаження транспортних кораблів, зовнішні складські платформи, ферми зі сонячними батареями. Цікавим об'єктом є "Купол" – кабіна із прозорим верхом для огляду космосу та Землі.

Орбіта МКС знаходиться на висоті 332–346 км, кут нахилу – 51,6°. За один день вона виконує 15,75 обертів навколо Землі. Середня швидкість 27 700 км/год. Планований час роботи станції на орбіті – 15 років. На теперішній час розглядають пропозиції з продовження експлуатації МКС до 2020 р.

Рис. 1.12. Міжнародна космічна станція

з пристикованими модулями і лабораторіями.

Головні напрями досліджень на борту Міжнародної космічної станції такі: 1) проведення фундаментальних досліджень, виробництво матеріалів і біопрепаратів в умовах мікрогравітації; 2) дослідження атмосфери і земної поверхні на користь фундаментальної науки і в прикладних цілях; 3) дослідження поведінки людського організму в умовах космічного польоту з погляду визначення стратегії подальшого освоєння космосу людиною, орбітальні споруди, виробництво на орбіті, міжпланетні перельоти, планетні бази тощо); 4) проведення досліджень і відробіток засобів на користь перспективних проектів (вивчення поведінки конструкцій, тросових систем, елементів міжпланетних кораблів тощо).

На МКС постійно працює екіпаж з трьох космонавтів, які змінюють кожні 180 діб. Загальні витрати з будівництва та експлуатації станції на сьогодні досягли 100 млрд. доларів.

Нині космічний простір використовують не тільки для дослідницьких цілей, але також *з метою туризму*. Першим космічним

туристом був американський бізнесмен італійського походження Деніс Тіто, який полетів на МКС 28.04.2001 р. Другим туристом був бізнесмен із ПАР Марк Шаттлворт (2002 р.). За польоти обидва заплатили Федеральному космічному агентству Росії по 20 млн. дол. 01.10.2005 р. до МКС стартував американський бізнесмен Грегорі Оксен, а 18.09.2006 р. – перша жінка – непрофесійний космонавт, американка іранського походження Ануше Ансарі. 07.04. 2007 р. почався політ п'ятого космічного туриста, американського мільярдера угорського походження, Чарльза Сімоні. Для нього були заплановані експерименти на замовлення Європейського космічного агентства (вплив невагомості на кров), а також він проводив власні наукові дослідження з впливу радіації. У жовтні 2008 р. у космосі в якості туриста побував Річард Герріот. Навесні 2009 р. Чарльз Сімоні, один із засновників Mikrosoft, знову перебував у складі космічної експедиції на МКС.

Підготовку космічних туристів проводять у Зірковому містечку під Москвою, а також у невеликих літаках, які симулюють невагомість. Незважаючи на те, що вартість підготовки космічних туристів зросла до 23 млн. дол., кількість бажаючих злетіти в космос зростає.

Освоєння космосу супроводжується і негативними впливами на навколоземний простір. На 2006 р., за даними щоквартального бюлетеня Orbital Debris Quarterly News, видаваного НАСА, на орбіті засобами спостереження відстежили близько 9 800 об'єктів, які з'явилися в космосі унаслідок пусків ракет-носіїв. Зокрема, це космічні апарати, ступені ракет-носіїв, різноманітні уламки, що з'явилися з різних причин: планове відділення частин супутників, а також об'єкти, що виникли в результаті ненавмисного розпаду апаратів. Найбільша кількість об'єктів "належить" Росії – 4 225. З них космічних апаратів (ті, що працюють і "померлих") – 1 380, ступенів носіїв і уламків – 2 865. На другому місці – США з 4 066 об'єктами (1 028 супутників і 3 038 ракет та уламків). На третьому місці Китай – 376 об'єктів (54 супутники і 322 ступені ракет та їхніх уламків). Франція на четвертому місці з 353 об'єктами (44 супутники і 309 ракет і уламків). Японії належить 181 об'єкт (96 супутників, 85 ракет та уламків), Індії – 139 об'єктів (31 супутник, 108 ракет та об'єктів). Всім іншим учасникам космічної діяльності належать 388 об'єктів (360 супутників і 28 уламків). На 2009 р., за уточненими даними, у навколоземному просторі перебуває близько 17 000 різних штучних об'єктів. Отже, освоєння

космосу тепер пов'язане з потребою враховувати засміченість приземного ближнього космосу зайвими штучними об'єктами, які варто видаляти швидше, ніж вони там нагромаджуються.

## 1.5. Історія створення космічних засобів спостереження Землі в Україні

Українські підприємства мають великий досвід створення та запуску в космос супутників різного призначення. Всього в Україні за радянські часи було розроблено більше 70 типів космічних апаратів серії "Космос", "Інтеркосмос", "Циклон", "Зеніт" та запущено на орбіту біля 400 космічних апаратів власної розробки та виготовлення.

Українські вчені, конструктори, ракетобудівники та численні наукові установи, конструкторські бюро, промислові підприємства були причетні майже до всіх важливих космічних проектів Радянського Союзу:

- запуску першого штучного супутника Землі;
- польоту першої людини в космос;
- програм польотів на Місяць та планети Сонячної системи;
- міжнародної програми "Інтеркосмос";
- запуску орбітальних станцій "Салют" і "Мир";
- запуску космічного ракетного комплексу "Енергія-Буран".

Перший пошуковий дніпропетровський супутник, який отримав в СРСР офіційну назву "*Космос–1*", було виведено на орбіту штучного супутника Землі 16 березня *1961* р.

У подальшому українські вчені та конструктори набули професійних знань та вмінь у галузі наукових досліджень навколоземного простору, Сонця та сонячно-земних зв'язків, океанографічних досліджень, спостереження Землі. За кожним з цих напрямів було створено декілька поколінь космічних апаратів, які успішно використовувалися для вирішення цільових завдань.

В 60-ті роки XX ст. в Україні у конструкторському бюро "Південне" розпочали розробку першого в СРСР метеорологічного супутника "Метеор". Виготовлення цих супутників до 1971 р. здійснювали у Дніпропетровську на південному машинобудівному заводі.

В 70-ті роки XX ст. в КБ "Південне" розпочалася розробка космічної системи природоресурсного призначення "Океан". Космічні апарати серії "Океан", які виготовляли на південному машинобудівному заводі, давали змогу здійснювати комплексне багатоспектральне дистанційне спостереження поверхні океанів та континентів. Дані дистанційного зондування Землі використовували для вирішення народногосподарських задач, у тім числі: прогнозування погоди та клімату, раціонального використання біологічних та мінеральних ресурсів океану, забезпечення господарської діяльності на шельфі, прогнозування льодової обстановки та проведення морських суден в Арктиці та Антарктиці. Всього за радянські часи було виготовлено та запущено в космос десять природоресурсних космічних апаратів серії "Океан".

Наприкінці 1991 р., після розпаду Радянського Союзу, Україна успадкувала майже третину радянського ракетно-космічного потенціалу.

Створене *в лютому 1992 р.* Національне космічне агентство України взяло під своє управління понад 30 конструкторських бюро, наукових організацій та установ, військових частин і промислових підприємств, які безпосередньо займалися космічною діяльністю. Серед них: дніпропетровські підприємства ДКБ "Південне" і "Південний машинобудівний завод", харківські – "Комунар", "Хартрон", НДІ радіовимірювань, київські – ЦКБ і завод "Арсенал", "Київприлад" і Київський радіозавод, чернігівський завод "Чезара", Євпаторійський космічний центр, Центр прийому та обробки спеціальної інформації і контролю навігаційного поля (м. Дунаївці Хмельницької обл.). Всього за два роки було здійснено об'єднання виробничих, наукових та експлуатаційних космічних фрагментів в єдине ціле – космічну галузь країни. Це дало змогу Україні розпочати самостійну космічну діяльність.

У 1993 році було розроблено та ухвалено першу Державну космічну програму України, яка мала зберегти науковий і виробничий потенціали космічної галузі, а також створити умови для виходу України на міжнародний ринок космічних послуг.

У *серпні 1995 р.* українська ракета-носій "Циклон-3" вивела на орбіту перший вітчизняний космічний апарат "Січ-1" (рис. 1.13), обладнаний засобами знімань Землі в оптичному і радіодіапазонах. Створення цього супутника дало змогу в основному замкну-

ти на національному рівні весь виробничий цикл космічної системи – від розробки і виготовлення до експлуатації і розповсюдження обробленої інформації.

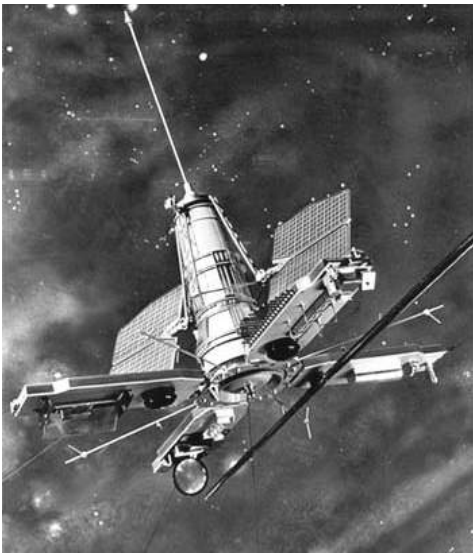


Рис. 1.13. Перший український супутник "Січ–1".

*19 листопада 1997 р.* у складі 24-ї місії космічного корабля "Спейс шатл Колумбія" здійснив політ перший космонавт незалежної України *Леонід Каденюк*. У ході 16-добового польоту український космонавт виконував наукові експерименти в галузі космічної біології, зокрема, проводив експерименти зі штучного запилення паростків сої і рапсу з метою отримання насіння в умовах невагомості.

У *грудні 1997 р.* Верховна Рада України ухвалила другу Загальнодержавну космічну програму України на 1998–2002 роки. Програму спрямували на формування внутрішнього ринку космічних послуг, а також на інтеграцію України до міжнародного космічного співтовариства і вихід на зовнішній ринок з власними продукцією та послугами. Важливе місце у цій Програмі приділили напряму космічного спостереження Землі. З метою формування космічного сегмента Національної системи спостереження Землі продовжили роботи за проектом "Січ".

*У листопаді 1998 р.* українські підприємства "Хартрон" і Київський радіозавод активно включилися в роботи зі створення Міжнародної космічної станції.

*У березні 1999 р.* відбувся перший пуск української ракетиносія "Зеніт-3SL" за міжнародною програмою "Морський старт". Україна разом з США, Росією і Норвегією стала учасницею грандіозного проекту комерційних запусків з плавучого космодрому в Світовому океані.

*У квітні 1999 р.* відповідно до українсько-російської програми "Дніпро" вперше з суто мирною метою стартувала в космос міжконтинентальна балістична ракета SS-18, розроблена і виготовлена в Україні. Сьогодні конверсійну ракету "Дніпро" активно використовують як носій для супутників різного призначення.

*У липні 1999 р.* ракетою-носієм "Зеніт-2" з космодрому Байконур виведено на орбіту українсько-російський космічний природоресурсний апарат *"Океан–О"*, на борту якого встановили комплекс апаратури у складі радіолокатора бокового огляду і трьох багатоспектральних скануючих пристроїв різної просторової роздільної здатності. Його головним завданням було вивчення і контроль параметрів Світового океану, континентального шельфу.

*31 липня 2001 р.* українською РН "Циклон-3" виведено на орбіту космічний апарат "АУОС–СМ–КФ", призначений для дослідження сонячної активності за спільним російсько-українським проектом "Коронас-Ф".

У *жовтні 2002 р.* Верховна Рада України ухвалила третю Загальнодержавну космічну програму України на 2003–2007 роки.

Серед головних завдань Програми – розвиток національної системи спостереження Землі з космосу в інтересах загальнодержавних потреб. Головні пріоритети надають орієнтації на конкретного споживача, розробленню та використанню проривних технологій, створенню умов для використання космічних технологій в інших галузях, багатоплановому міжнародному співробітництву.

Одним з найважливіших завдань космічних програм України є розвиток Національної космічної системи спостереження Землі "Січ". Космічний сегмент цієї системи ґрунтується на підставі послідовного створення та експлуатації таких космічних систем, як "Січ–1М", "Січ–2", "Січ–3" та мікросупутників "МС–1–ТК" і "МС–2–8". Реалізація даних планів забезпечить Україні безперервне отримання інформації від національних космічних засобів, послідовне підвищення просторово-часових і спектральних характеристик бортової апаратури, розширення сфер науково-прикладного та комерційного використання супутникових даних.

*24 грудня 2004 р.* з космодрому Плєсєцьк (Росія) українською ракетою-носієм "Циклон-3" виведений на орбіту черговий супут-

ник дистанційного зондування Землі "*Січ–1М*", який відрізнявся від свого попередника "Січ–1" більшими можливостями. Того ж року запустили перший український мікросупутник "МС–1–ТК".

Космічний апарат "Січ–1М" є продовженням серії супутників дистанційного зондування Землі "Океан–О1" і "Січ–1". Його розроблено у рамках Національної космічної програми України на 2003–2007 роки й Космічної програми Росії на 2001–2005 роки.

Головні завдання космічного апарата "Січ–1М": 1) ведення оглядової всепогодної льодової розвідки в полярних районах; 2) визначення зон штормів і тайфунів в окремих районах Світового океану; 3) визначення температури поверхні океану, швидкості приводного вітру; 4) виявлення оптичних і радіолокаційних неоднорідностей водної поверхні; 5) проведення моніторингу підстилаючої поверхні Землі з лінійною роздільною здатністю не гірше 35 м; 6) проведення моніторингу атмосфери океану й суші; 7) експериментальне льотне відпрацювання апаратури супутникової навігації; 8) проведення міжнародного наукового експерименту "Варіант".

Космічний апарат "Січ–1М" розроблено Державним конструкторським бюро "Південне" імені М.К. Янгеля в кооперації з конструкторськими організаціями й НДІ Росії та України і виготовлено виробничим об'єднанням "Південний машинобудівний завод" імені О.М. Макарова.

До складу бортового спеціального комплексу входить апаратура української й російського розроблення: радіолокаційна станція бокового огляду (РЛС БО); скануючий радіометр РМ-0,8; оптико-електронні багатозональні скануючі пристрої МСУ–ЕУ1 і МСУ–ЕУ2; багатозональний скануючий пристрій з малою роздільною здатністю МСУ–М; оптико-мікрохвильовий сканер МТ-ВЗА–ЩК.

Крім того, на борту КА "Січ–1М" розміщено комплекс апаратури "Варіант" для реєстрації електричного струму в космічній плазмі, статистичного дослідження проявів сейсмогенних ефектів в іоносфері та їхньої селекції на тлі іоносферних збурювань геліофізичного походження. "Варіант" розроблено науковими установами України, Росії, Польщі, Великобританії і Франції під науковим керівництвом Львівського центру Інституту космічних досліджень НАНУ–НКАУ.

Управління КА "Січ–1М" на початковому етапі польоту здійснювали з Центру управління польотами (ЦУП) Центрального науково–дослідного інституту машинобудування ФКА РФ в м. Корольов Московської області, потім управління передано в Євпаторію, в ЦУП Національного центру управління й випробувань космічних засобів України.

Вперше для проведення льотно-конструкторських випробувань супутника було задіяно Систему контролю та аналізу космічної обстановки. З метою удосконалення балістико-навігаційного забезпечення було модернізовано елементи наземного комплексу управління апарату "Січ–1М".

Перший український експериментальний мікросупутник *"МС–1ТК"* створено для відпрацювання супутникової платформи МС–1, нових конструктивно-технологічних рішень, технології планування проведення спостережень у реальному масштабі часу, а також для вирішення окремих завдань дистанційного зондування Землі. Проте внаслідок того, що космічні апарати "Січ–1М" та "МС–1–ТК" виведено на нештатну орбіту, повністю програму досліджень, яку заплановано, виконати не вдалося.

*У грудні 2005 р.* керівник Національної космічної Адміністрації США (NASA) Майкл Гріффін офіційно запросив Україну до участі у Новій космічній ініціативі США щодо дослідження тіл Сонячної системи, яку оголосив Президент Дж. Буш у січні 2004 р.

*У липні 2006 р.* затверджено Програму російсько-українського співробітництва в галузі дослідження та використання космічного простору на 2007–2011 роки та підписано План українсько-китайського співробітництва у сфері дослідження та використання космічного простору в мирних цілях на 2006–2010 роки.

*У квітні 2007 р.* конверсійна *ракетаносій* "Дніпро1" вивела на орбіту перший супутник для Єгипту *"EgyptSat1"*, розроблений та виготовлений в Україні.

*У червні 2007 р.* з космодрому Байконур здійснено успішний запуск української ракети-носія "Зеніт-2" за новою міжнародною програмою "Наземний старт".

Майже *за 15 років* напруженої роботи НКАУ і підприємств української космічної галузі забезпечено 100 запусків ракет-носіїв "Зеніт", "Циклон", і "Дніпро", що становить 7,9% від світових запусків. Найбільше запусків відбулось у 1994 р. – 12, найменше

у 2002 р. – 2. Запуски виконують з космодромів Байконур (Казахстан), Плесецьк (Московська обл.), "Морський старт" (Атлантичний океан біля берегів Бразилії). За роки незалежності виведено в космос понад 200 космічних апаратів на замовлення десяти країн. Сьогодні Україна посідає третє в світі місце за кількістю запусків ракет-носіїв.

Україна стала відома на світовому ринку своєю космічною продукцією: ракетами-носіями "Зеніт", "Циклон", "Дніпро"; космічними апаратами "Січ" та АУОС; апаратурою стикування "Курс" для Міжнародної космічної станції; системами прицілювання ракет, апаратурою систем керування для космічних комплексів "Союз", "Прогрес", "Протон"; унікальними об'єктами наземної інфраструктури: радіотелескопом РТ-70, контрольно-коригувальними станціями для глобальних навігаційних супутникових систем, мережею спостережень за геофізичними явищами на земній кулі.

Провідні підприємства галузі беруть участь у реалізації понад 50 міжнародних космічних проектів, найбільш значні з яких: "Морський старт", "Дніпро", "Наземний старт", "Циклон-4", "Вега", "МКС", "Радіоастрон", "Спектр", "Егнос-Галілео".

Сьогодні дослідження з дистанційного зондування Землі є одним з актуальних напрямів космічної діяльності України.

У рамках Національної космічної програми України на 2008–2012 р. сплановано створення системи геоінформаційного космічного забезпечення як складової загального геоінформаційного забезпечення потреб держави та суспільства. Створення цієї системи дасть змогу визначати джерела та розміри небезпеки для ухвалення рішень у кризових ситуаціях, а також забезпечить умови для появи та подальшого зростання попиту на послуги дистанційного зондування та розширення ринку цих послуг.

Створення Національної системи геоінформаційного забезпечення дасть змогу: а) оперативного забезпечення вітчизняних та закордонних користувачів якісною видовою космічною інформацією, у тім числі органів державної влади для ухвалення рішень у сферах управління та безпеки, а також інших структур на комерційній основі; б) розроблення та практичного використання проривних інформаційних технологій у дистанційному зондуванні, створення умов для використання новітніх технологій у різних

галузях народного господарства; в) створення новітніх методик і технологій оброблення та інтерпретування даних дистанційного зондування на основі комплексування цих даних з даними геологічних, геофізичних, сейсмічних та інших спостережень і вимірювань; г) інтеграції технологій дистанційного зондування, геоінформаційних та інтернет–технологій; д) мінімізувати витрати держави на космічну діяльність і сприяти подальшому його розвитку, зокрема, виходу України з обґрунтованими пропозиціями на світовий ринок космічних послуг.

Україну сьогодні вважають космічною державою, зокрема, якщо причетними до космосу у світі вважають близько 140 країн, то країн, які мають повний цикл виробітку космічної техніки, у світі всього п’ять. Україна належить до цієї “п’ятірки”. Нині Україна бере участь в міжнародних програмах, підписала угоду з Російською Федерацією, з Європейським космічним агентством,

*а* *б*

Рис. 1.14. Старт ракет-носіїв українського виробництва:
*а* – “Зеніт-2”, *б* – “Дніпро”.

з США, Індією, Японією, Бразилією, Китаєм. З часів Радянського Союзу в Україні була і залишилася майже третина космічної промисловості, є національні космічні агентства, відповідна інфраструктура, яка забезпечує польоти в космос, центр космічної телекомунікації, центри з прийому сигналів з космосу тощо.

Широко впроваджують нові проекти. Це програма "Морський старт", в якій бере участь наша країна, а також Росія, США і Норвегія. У цій програмі Україна є головним партнером, оскільки надає для використання ракету-носій "Зеніт" українського виробництва. Іншу ракету-носій "Дніпро" теж використовують для запуску ШСЗ у космос (рис. 1.14). Є цікава сумісна програма з Бразилією з використанням Бразильського космодрому в районі екватора.

Високі технології в будь-якій країні світу пов'язані в першу чергу з авіаційною і космічною галузями. Це значно піднімає статус держави. Космічні держави вважають сучасними, високотехнологічними.

## 1.6. Українські імена в історії космонавтики

Українські вчені зробили значний внесок у розвиток дистанційних досліджень Землі. Це О. Кованько, О. Засядько, К. Константинів, М. Кибальчич, К. Ціолковський, Ю. Кондратюк, І. Сікорський, Г. Лангемак, С. Гризодубов, В. Глушко, М. Яримович, І. Богачевський, М. Решетньов, С. Корольов, А. Люлька, Ю. Побєдоносцєв, М. Янгель, В. Чоломей, Г. Лозино-Лозинський, Г. Береговий, П. Попович, П. Брацлавець, Г. Добровольський, Л. Кизим, Л. Каденюк та ін.

Ще належить по гідності оцінити подвижництво дореволюційних винахідників І. Третесського, Ф. Гешвенда. Мало знаємо поки що про діяльність на цьому терені наших земляків Р. Лангемака, В. Разумова, Д. Севрука, М. Кисенко, Р. Кисунько, В. Ковтуненко, В. Будника та ін. Як і представників інших націй, що працювали на космос в Україні, зокрема, Я. Айзенберга [97, 106].

*Олександр Дмитрович Засядько* (1779–1837) генерал-лейтенант – відомий у російській військовій історії як видатний конструктор бойових ракет. Родом з села Лютенька на Полтавщині, нащадок

О.Д. Засядько

запорізьких козаків: прадід та дід були Лубенськими сотниками, а батько – головним гармашем (гарматником) Війська Запорозького, що мало на своєму озброєнні "літаючі рурки" – своєрідні ракети, в тім числі й шестиступеневі. У війні з Наполеоном дослужився до чину полковника, був нагороджений шпагою, яку в ті часи носив лише Багратіон.

Продав власний маєток, щоб гроші використати на створення ракет. Відкрив секрет виготовлення ракет, отримав посаду начальника штабу артилерії в російській армії. Створив ракети трьох калібрів, розробив технологію їхнього виготовлення, створив запускові станки власної конструкції з пристосуванням до націлювання, з яких можна було виконувати залп з шести ракет. Зорганізував виробництво ракет на спеціальному заводі в Петербурзі, який згодом було переведено на південь імперії – в Миколаїв, потім у Шостку. Сформував перший у російській армії ракетний підрозділ, який успішно діяв у російсько-турецькій війні. Заклав організаційні передумови ракетобудування. На старість поселився в Харкові, де і помер у 1837 р. Похований у Курязькому монастирі, де згодом діяла трудова колонія Макаренка [110].

Естафету розвитку ракетної техніки після смерті Олександра Засядька підхопив інший наш земляк, вихідець з Чернігівщини *Костянтин Константинів* (1818–1871). Він не тільки удосконалив бойові ракети свого видатного попередника, але отримав усесвітнє визнання за великі теоретичні розробки в галузі ракетобудування. Зокрема, ним був запропонований і створений балістичний маятник для випробування нового вигляду озброєнь. Крім того, К. Константинів заснував в Миколаєві перший ракетний завод, де одночасно розташовувалися власне конструкторське бюро, дослідне і масове виробництва, а також підготував школу фахівців цієї області науки і техніки.

*Олександр Матвійович Кованько* – поручик першої повітроплавної команди у 1886 р. (через 28 років після польоту француза Гас-

пара Фелікса Турнашона (Надара) над Парижем) вперше на території Росії з гондоли повітряної кулі на висотах 600 м і 1400 м сфотографував Петербург та його околиці, започаткувавши цим створення фотопланів місцевості з деталями, недоступними під час виконання геодезичного інструментального знімання. Ці ж знімки стали підставою для започаткування військового фотографічного розвідування, яке успішно застосовували вже в Першій світовій війні, а в Другій світовій війні стало атрибутивним під час планування військових операцій.

О.М. Кованько

*Микола Іванович Кибальчич* (1853–1881) – син священика з м. Короп на Чернігівщині. Навчався в Петербурзькому інституті шляхів сполучення. За читання і зберігання забороненої літератури його заарештували у Петербурзі і посадили в Лук'янівську тюрму в Києві. У тюрмі розробив ідею створення літального апарата для міжпланетного сполучення. Після виходу на волю облаштував динамітну лабораторію, виготовляв бомби, однією з яких був страчений цар Олександр II. За це був заарештований з вироком "смерть через повішання". У казематах Петропавлівської фортеці записав свої ідеї і розрахунки реактивного зорельота. Рукопис віддав тюремному начальству для передання вченим. Кибальчича стратили 3 квітня 1881 р., а рукопис віддали в архів. Проте в 1919 р. його опублікував журнал "Былое".

М.І. Кибальчич

*Констянтин Едуардович Ціолковський* (1857–1935) – учитель з м. Калуга у Підмосков'ї, далекого від університетів.

К.Е. Ціолковський

Через два роки після смерті Кибальчича закінчив роботу над рукописом "Вільний простір", у якій розглянув перспективи використання реактивного принципу руху для здійснення польоту у космос, розробив схему апарата для польоту людини в космос, опублікував формулу для розрахунку польоту з урахуванням сили тяжіння, маси апарата і швидкості польоту.

Світу К. Ціолковський відомий як великий російський вчений. Однак біографи довідались, що рід його походить з України, а родовід – від Северина Наливайка[1], уродженця Гусятина, що на Тернопільщині. Брат К. Ціолковського підписувався "Ціолковський – Наливайко"[2]. Батько Е. Ціолковський – лісничий за професією, народився у селі Коростяне на Рівненщині[3].

Ю.В. Кондратюк

*Юрій Васильович Кондратюк[4] (Шаргей)* – (1900–1941) син матері Людмили – учасниці антиполіційної демонстрації у Києві у 1900 р., яка після тортур і народження дитини в тюрмі померла. Хлопчика виховала сім'я Доценків з Полтави. Зі срібною медаллю закінчив Полтавську ґімназію і вже від тоді захопився ідеєю польоту до інших небесних тіл. Навчався у політехнічному інституті в Петрограді, але потрапив солдатом на війну. Потім працював механіком на цукровому заводі у Кіровоградській області. Постійно продовжував працювати над своєю "космічною" ідеєю. В 1929 р. на власний кошт видав книжку "Завоювання міжпланетних просторів", у якій розглянув будову міжпланетних кораблів,

---

[1] Северин Наливайко – ватажок селянсько-козацького повстання проти польської шляхти. Після тортур страчений у Варшаві.

[2] Автор статті в газеті "Молодь України" №12 від 14–18 липня 2008 року зазначає, що родичі Ціолковського жили у Львові, в Сокалі та Жидачеві.

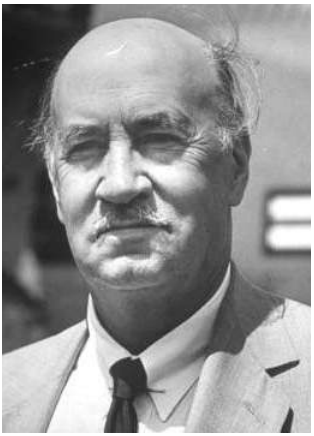
[3] За рік до народження К. Ціолковського сім'я переїхала в Росію.

[4] Біографи вважають, що прізвище Кондратюк, під яким він увійшов у історію, є видуманим для маскування перед ГПУ – НКВД і що справжнє його прізвище – Шаргей Олександр Гнатович.

формули навантажень, типи траєкторій польотів. Був заарештований ГПУ за розроблення проекту великого зерносховища, яке планував збудувати без цвяхів. Це було оцінено як шкідництво. У Харкові працював над проектами потужних багаторівневих вітрових електростанцій. Вважають, що загинув рядовим московського народного ополчення 3 жовтня 1941 р. Це йому Олесь Гончар дав оцінку "геній в солдатських обмотках".

За розрахунками Кондратюка–Шаргея у липні 1969 р. американці здійснили політ на Місяць. Про це вони самі оголосили, відкривши для світу ім'я славного українця.

*Сікорський Ігор Іванович* (1889–1972), авіаконструктор і підприємець, автор ідеї гелікоптера, автор літаків-велетнів "Ілля Муромець" (1913, Росія), S-29 A (США), конструктор першого в США літака-амфібії. Народився 1889 р. в Києві, у родині професора-медика Київського університету. Закінчив Морський кадетський корпус (1906) в Петербурзі та Київський політехнічний інститут (1914). Навчався також у Паризькій технічній школі (1906).



І.І. Сікорський

У липні 1909 р. на подвір'ї свого будинку в Києві І.І. Сікорський побудував перший у Росії гелікоптер і провів натурні випробування. Однак підіймальна сила гвинтів була недостатньою. Перший свій літак І.І. Сікорський побудував у квітні 1910 р., але недостатня потужність двигуна не дала змоги апаратові стати першим літаючим літаком вітчизняної конструкції. Вперше піднятися в повітря І.І. Сікорському вдалося 3 червня 1910 р. на другому літакові власної конструкції. Більш досконалою моделлю став С-5 зі злітною вагою 440 кг, розмахом верхнього крила 12 м та двигуном 50 к. с., побудований у квітні 1911 р. Це був літак з добрими льотно-технічними та пілотажними характеристиками. На ньому І.І. Сікорський здав іспит на звання пілота, встановив чотири всеросійських рекорди, здійснював показові польоти.

У грудні 1911 р. Сікорський на літаку власної конструкції С-6 встановив світовий рекорд швидкості польоту з екіпажем

(111 км/год). У 1912 р. І.І. Сікорського, якому виповнилося лише 22 роки, запросили на посаду головного конструктора авіаційного відділу Російсько-Балтійського вагонного заводу. У 1913 р. до нього прийшло всесвітнє визнання за збудовані перші успішні багатомоторні літаки-гіганти "Гранд" ("Руський Витязь") та "Ілля Муромець". 1914 р. на "Іллі Муромці" встановили світовий рекорд вантажопідйомності. У роки першої світової війни "Муромці" нових модифікацій пішли в серію, було створено їх ескадрилью, яка ефективно діяла на фронті. У роки війни І.І. Сікорський створив ще декілька типів літаків: легких типу винищувача-перехоплювача, розвідників, винищувачів супроводу, штурмовиків та інших типів. Фактично було закладено основи російської авіаційної промисловості. Після революції 1917 р. виробництво на Російсько-Балтійському вагонному заводі занепало, поставки порушилися, замовлення не надходили. І. Сікорський вимушений був залишити завод. Його запросили продовжити працю у Франції (1918).

У 1919 р. емігрував до США, де в 1923 р. заснував авіаційну фірму "Sikorsky Aero Engineering Corporation", у якій зайняв посаду віце-президента. Протягом 1925–1940 рр. розробив серію надзвичайно успішних літаків (близько 15 типів), які принесли США престиж та рекорди.

Наприкінці 30-х років І.І. Сікорський перейшов на створення гелікоптерів. Перший американський експериментальний вертоліт VS-300, створений Сікорським, відірвався від землі 1939 р. І. Сікорський першим почав будувати турбінні гелікоптери, гелікоптери-амфібії з шасі, що прибираються, і "літаючі крани". На його вертольотах були вперше здійснені перельоти через Атлантичний океан (S-61; 1967) і Тихий океан (S-65; 1970) (з дозаправкою в повітрі). Гелікоптери І. Сікорського марки "S" (Sikorsky) 1941 року прийняті на озброєння Збройними силами США. У цілому фірма І. Сікорського "Sikorski Airkraft" створила 17 базових літаків та 18 вертольотів. Останнім гелікоптером, побудованим Сікорським до виходу на пенсію, став S-58 (він по праву вважається кращим вертольотом першого покоління). З виробництва гелікоптерів І.І. Сікорського почалося серійне вертольотобудування не лише в США, а й у Великобританії та Франції. Про високу гарантію польотів на гелікоптерах І. Сікорського свідчать факти постійного використання їх президентами США як VIP-транспортних засобів.

І. Сікорський удостоєний понад 80 різних високих нагород. Він — володар рідкісної відзнаки: меморіального призу братів Райт. Видатний авіаконструктор є почесним доктором багатьох університетів світу. Помер Ігор Сікорський в Істоні (штат Коннектикут, США).

*Архип Михайлович Люлька* (1908–1984) – вперше розробив турбореактивні двигуни для надзвукової авіації. Зробив перші кроки у цьому напрямі ще у 30-х роках XX ст. Народився в с. Саварка Богуславського району Київської області, був конструктором авіаційних двигунів (ТРД), академіком АН СРСР (1968); членом-корреспондентом (1960).

А.М. Люлька

У 1925 р. закінчив ремісниче училище в Білій Церкві, 1930 р. – Київський політехнічний інститут. Працював в авіаційній промисловості в Харкові, Ленінграді, Москві. В 1933–1937 рр. працював над проблемою застосування газової турбіни як двигуна для літаків, обґрунтував доцільність застосування реактивних двигунів для швидкісних літаків. У 1938 р. група Архипа Люльки розробила двигун РГД-1, що дав змогу літаку розвинути швидкість до 900 км/год. У 1939–1941 рр. розробив конструкцію двоконтурного турбореактивного двигуна, що стала прототипом нинішніх двигунів. У 1948 р. побудував перший такий двигун, який успішно пройшов випробування, а пізніше сконструював низку потужних турбореактивних двигунів. З 1946 р. – генеральний конструктор авіаційних двигунів.

Восени 1957 р. відбулися випробування літака СУ-7, який вперше перевищив швидкість звуку вдвічі. На базі цього літака згодом були створені бомбардувальник і штурмовик. Один з останніх сконструйованих Люлькою двигунів АЛ-31 Ф стоїть на всесвітньо відомому літаку СУ-27, на якому встановлено 27 світових рекордів і виконано надскладні фігури вищого пілотажу. Винахід А. Люльки – двигун АЛ-29, було встановлено на макеті-аналозі космічного корабля багаторазового використання "Буран".

*Сергій Павлович Корольов* (1907–1966) учений і конструктор, організатор ракетної та космічної програм СРСР, засновник практич-

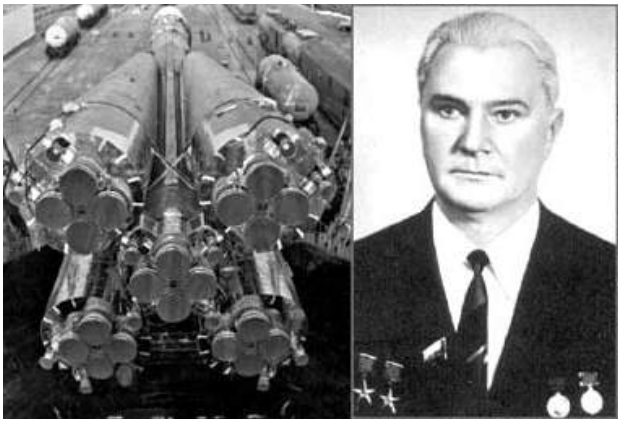
С.П. Корольов

ної космонавтики, член Академії наук СРСР (1958); двічі Герой Соціалістичної Праці (1956, 1961); лауреат Ленінської премії (1957); Золота медаль імені К.Е. Ціолковського АН СРСР.

Народився у Житомирі, дитинство пройшло в Ніжині. В Одесі закінчив будівельно-промислову школу, працював ремонтником-покрівельником. Пізніше обслуговував гідролітаки Чорноморського флоту, мав дозвіл на участь в польотах. Сімнадцятирічним став студентом Київського політехнічного інституту (механічний факультет), пізніше перевівся до Московського вищого технічного училища на факультет аеромеханіки. З 1929 р., після знайомства з Ціолковським, почав працювати над ракетною технікою. Став творцем першого штучного супутника Землі та літальних космічних апаратів.

У 1930 р. працював у Центральному аерогідродинамічному інституті. В 1931 р. створив й очолив Групу з вивчення реактивного руху (ГВРР). У 1933 р. – заступник директора Реактивного інституту, в 1934 р. – керівник відділу ракетних літальних апаратів інституту. У 1942–1946 рр. працював в ОКБ заступником головного конструктора двигунів. Подальшу діяльність С.П. Корольова як керівника великого колективу було спрямовано на створення потужних ракетних систем. Він розвивав теорію ракетного польоту в стратосфері (1934 р.). Група вивчення реактивного руху побудувала першу радянську рідинну ракету "ГИРД-09". Під його керівництвом створено численні балістичні та геофізичні ракети, ракети-носії і пілотовані космічні кораблі "Восток" та "Восход", на яких вперше в історії здійснено космічні польоти людини і вихід людини в космічний простір. Під його керівництвом проводили запуски штучних супутників Землі і Сонця, польоти міжпланетних автоматичних станцій до Місяця, Венери і Марса, зроблено м'яку посадку на поверхню Місяця, створено серію штучних супутників Землі. С. Корольов керував роботою численних науково-дослідних інститутів і конструкторських колективів, об'єднуючи їх на вирішення комплексних завдань ракетобудування, виховав численні кадри учених та інженерів.

Раптова смерть 14 січня 1966 р. стала втратою як для радянської, так і світової космонавтики. Рівної С.П. Корольову особистості в цій галузі так і не знайшлося у жодній країні світу. Мрії, ідеї, плани нашого славетного земляка реалізуються сьогодні. Все це – переконливе свідчення історичної значимості й цінності діяльності С.П. Корольова.



В.П. Глушко

*Валентин Петрович Глушко* (1908–1989) народився в Одесі. Батько – потомок українських козаків, мати – російська селянка. В юні роки був співробітником Одеської астрономічної обсерваторії, організатором гуртка молодих "міровєдов". У 16 років став автором газетних та журнальних публікацій з історії розвитку ідей міжпланетних подорожей, зазначав необхідність міжпланетних сполучень. У 1925 р. став студентом фізико-математичного факультету Ленінградського університету. Спілкувався з К. Ціолковським, М. Тихомировим, А. Іоффе, С. Корольовим. Став головним конструктором ракетних двигунів, був генеральним конструктором ракетно-космічного комплексу багаторазового використання "Буран".

*Богдан-Тарас Гнатюк* (1915–1998) – інженер-конструктор літаків, Член Товариства українських інженерів Америки, Американського Інституту аеронавтики й астронавтики. Випускник Заліщицької гімназії (1935) на Тернопільщині.

Під час Другої світової війни Богдан Гнатюк працював у Віденському університеті в галузі швидкохідної аеронавтики та турбореактивних двигунів. Через наближення фронту і наступ Червоної армії його було переведено до великого авіаційного виробництва у Дор-нтер-Верке (поблизу кордону із Швейцарією). До еміграції в США у 1949 р. Б. Гнатюк устиг іще попрацювати у Міністерстві військово-повітряних сил Франції.

Деякий час у США Богдан Гнатюк співпрацював з відомим конструктором ракет Вернером Фон Брауном, брав участь у створенні міжконтинентальних балістичних ракет. Доктор Б. Гнатюк був членом Американського інституту аеронавтики і астронавтики, Асоціації військово-повітряних сил США, Американської спілки університетських професорів та ін. професійних об'єднань. Б. Гнатюк був одним із головних творців американських міжконтинентальних балістичних ракет "Трайдент", які стартують з підводних човнів. У перекладі українською це слово означає "тризуб".

Незважаючи на велику зайнятість – викладацьку роботу в університеті і працю експертом та радником в центрах космічних польотів і різних фірмах військового напряму, Б. Гнатюк не забував своє українське коріння, беручи діяльну участь в українському громадському житті в США. Б. Гнатюк – автор наукових праць англійською, німецькою і українською мовами з аеронавтики, публікацій у періодиці.

*Йосип Харик* (1920) народився у Канаді, в провінції Альберта, у родині емігрантів з Чорткова (Тернопільщина). Закінчив Альбертський університет і став розробником новітніх технологій космічного зв'язку. Здобув диплом доктора аеронавтики, викладав аеронавтику і супутниковий зв'язок у кількох престижних університетах США, очолював дослідні лабораторії. Президент Джон Кенеді доручив Й. Харику керівництво Корпорацією супутникового зв'язку. З його іменем пов'язують у США запуск першого космічного супутника зв'язку. Коли це відбулося 7 квітня 1965 р., преса писала, що "українець змінює обличчя світу". Й. Харик обраний почесним доктором Альбертського та Болонського (Італія) університетів.

*Ігор Богачевський* (1928) народився в м. Сокаль Львівської області. У 1948 р. емігрував до США. Працював задля прожиття й оплати навчання в університеті. Був солдатом у Корейській війні 1950–1952 рр. На ветеранську стипендію продовжив нав-

чання на денному відділенні Нью-Йоркського університету, а у 1956 р. захистив ступінь бакалавра з аеронавтики. Вивів формули, які дозволяють розрахувати повернення космічного корабля на орбітальну станцію з поверхні іншої планети. Завдяки формулі Богачевського було розраховано політ американських астронавтів на кораблі "Аполлон-11" на Місяць і їхнє повернення на Землю.

М. Яримович

*Михайло Яримович* (1934) уродженець Підляшшя[5], емігрував разом з батьками в США. Там здобув середню освіту. У 1955 р. отримав диплом бакалавра за спеціальністю "Інженер аеронавтики" у Нью-Йоркському університеті, у 1956 р. – магістерський диплом інженера-механіка в Колумбійському університеті і у 1960 р. – докторський ступінь. Юнак швидко зарекомендував себе як талановитий інженер, який пропонував оригінальні ідеї та добивався їхнього втілення у життя. Саме через це на початку 60-х років його залучають до створення орбітальної станції у навколоземному просторі.

У 1964 р. М. Яримович стає відповідальним за функціонування всіх систем космічних кораблів "Аполлон" у НАСА. Через рік його призначають технічним директором проекту зі створення орбітальної станції з екіпажем, що було практичним кроком до майбутніх міжпланетних польотів.

1970–1973 рр. Яримович займає посаду директора дорадчої групи аерокосмічних досліджень при НАТО в Парижі. З 1973 р. працює головним науковим консультантом при штабі Військово-Повітряних сил США у Вашингтоні. З 1975 р. – асистент-адміністратор при федеральному агентстві в питаннях освоєння джерел енергії. У 1977 р. інженер стає віце-президентом аерокосмічного підрозділу потужної промислової корпорації Rockwell, яка у 90-х роках влилася в Boeing. До свого звільнення з компанії у 1998 р. Яримович займав ключові посади в її наукових центрах, які спрямовували роботу всіх підрозділів у напрямку високотехнологічних розробок.

---

[5] Підляшшя – тепер територія Польщі (східна частина, північніше від Холмщини), колись густо заселена українцями, після Другої світової війни під час операції "Вісла" переселеними на Україну, на північ та захід Польщі, чи розсіяними по світу.

З 1991 р. по 1997 р. Михайло Яримович займав посаду президента Міжнародної академії аеронавтики, а до цього шість років був її віце-президентом. Один з найвизначніших проектів інженера – це Система глобального позиціонування (GPS), яка дозволяє будь-кому точно визначати свої координати у будь-якому місці Землі. У 2006 р. академія аеронавтики вручила йому почесну нагороду імені Теодора фон Кармана, визнаючи його відданість аерокосмічній справі на службі в уряді, промисловості та міжнародному співтоваристві. Цю видатну міжнародну нагороду вчений отримав за неоціненний вклад у космічні програми людства, такі як Аполлон та Космічний шатл, за його важливу роль у створенні Системи глобального позиціонування, за розвиток космічних літальних апаратів.

Після здобуття Україною незалежності, М. Яримович сприяв залученню українських науковців до співпраці з відповідними американськими, європейськими структурами та НАТО. За його участю реалізують міжнародний проект "Морський старт" (Sea Launch), де використовують українську ракету "Зеніт". М. Яримович – іноземний член НАН України ("технічна механіка", США, обраний 1992 р.), почесний член Наукового Товариства імені Шевченка та Української Вільної Академії Наук. Франція теж віддала належне нашому вченому – М. Яримович обраний членом французької Академії з питань авіації та космосу. Поширення набув крилатий вислів "Юрій Кондратюк спроектував політ на Місяць, а Михайло Яримович його реалізував".

М. Яримович і нині вважається авторитетним спеціалістом-консультантом у космічній галузі зі світовим ім'ям. Разом зі своєю дружиною Роксоланою він мешкає в м. Оспрей, штат Флорида, США.

*Володимир Миколайович Челомей* (1914) – творець пульсуючого повітряно-реактивного двигуна, крилатих ракет, потужних ракетносіїв ("Протон"), легкого космічного літака, орбітальних станцій.

В.М. Челомей народився 30 червня 1914 р. у м. Сідлець Привіслянського краю (сучасна Польща) у родині вчителів. Невдовзі розпочалася Перша світова війна, і сім'я Челомеїв переїхала до Полтави. У Києві Володимир закінчив семирічну школу і в 1929 р. вступив до автомобільного технікуму. Подальша освіта – на авіаційному факультеті Київського політехнічного інституту (1932 р.) і в Київському авіаційному інституті (КАІ), у який було перетворено авіаційний

В.М. Челомей

факультет КПІ у 1933 р. Виконуючи на другому курсі домашню роботу з теплового розрахунку авіаційного двигуна, 19-річний В.М. Челомей застосував власний метод розрахунку, використавши векторне обчислення. Працю опублікували в "Трудах КАИ". Всього за час навчання В.М. Челомей опублікував у цьому виданні 20 наукових статей. Під час практики на заводі "Мотор Січ" на прохання конструкторів заводу читає їм лекції з теорії коливань. Тут він проводить перші досліди з конструкції пульсуючого повітрянореактивного двигуна (ПуПРД), теорію якого почав розробляти.

Достроково закінчив КАІ у 1937 р., працював в Інституті математики АН УРСР. У 1939 р. захистив кандидатську дисертацію з коливань в авіаційних конструкціях, а в 1940–1941 рр. став наймолодшим докторантом наук при АН СРСР. На початку червня 1941 р. захистив докторську, але її затвердження у Вищій атестаційній комісії зірвала війна.

Під час війни В.М. Челомей продовжує роботу над ПуПРД, а потім – над літаком-снарядом з цим двигуном. У 1944 р. призначений директором – головним конструктором заводу № 51 для випуску цієї зброї. Вже наприкінці 1944 р. літаки-снаряди були випробувані і підготовлені до випуску. Однак, використати їх не довелося. Після війни В.М. Челомей створив ще кілька модифікацій цієї зброї та шукав шляхи підвищення її точності. Очолив конструкторську групу, що створила перші крилаті ракети для ВМФ, крила яких – вперше у світі – розкривалися у польоті. Крилаті ракети Челомея могли уражати цілі і в морі, і на березі, як з моря, так і з берега.

У 1959 р. В.М. Челомей став Генеральним конструктором. У 1960 р. його КБ розпочало розроблення супутників і міжконти-

нентальних стратегічних ракет. Наприкінці 1963 р. було запущено челомеїв супутник "Польот-1", що вперше у світі міг змінювати свою орбіту, тобто був маневруючим.

Розроблені Челомеєм бойові ракети УР-100 могли до десяти років стояти готовими до запуску. Це було нове слово у ракетній техніці.

Ракету УР-500, яку назвали "Протон", перетворили у більш могутні "Протон-К" та "Протон-М". Вони можуть виводити на орбіти супутники масою до 22 т, а на міжпланетні траси – станції масою понад 5 т. Конструкторське бюро Челомея конкурувало з КБ С. Корольова, який мав більшу урядову підтримку. Проте невдалі запуски ракет типу Н-1 КБ Корольова призвели до використання ракети "Протон" Челомея для проекту обльоту Місяця (1969–1970).

В. Челомей розробляв також пілотовані орбітальні станції типу "Алмаз". Готові корпуси станції за рішенням ЦК КПРС, які передали групі С.П. Корольова, були виведені на орбіту під назвою "Салют" (1971). Подальші орбітальні станції серії "Алмаз" В. Челомея виводились на орбіту з назвою "Салют-2", "Салют-3" і "Салют-5".

Зазначимо, що "Алмази" виникли знов як безпілотні автоматичні станції. Такими їх зробив В.М. Челомей у 1976–1977 рр. Американці визнавали, що своїми апаратами Челомей випередив їх на 15 років. Безпілотний "Алмаз" літав у 1991 р. Багато конструктивних рішень, зокрема, ідеологію орбітальних станцій та технологію створення великих космічних конструкцій, вперше розроблених для "Алмазу", використовували й використовують зараз. Це станція "Мир" та сучасна Міжнародна космічна станція. Наголосимо, що її основу виконує функціонально-вантажний блок транспортного корабля постачання (модуль "Зоря"), виготовленого для ОПС "Алмаз". Отже, створення міжнародної космічної станції стало можливим завдяки використанню ракетиносія "Протон" та конструкцій і технологій відпрацьованих під час виробництва цієї ракети та комплексу "Алмаз".

У 60-х р. XX ст. В.М. Челомей розпочав розробку легкого космічного літака (ЛКЛ), який можна було б виводити у космос ракетою "Протон". Хороші результати випробувань натурних макетів дали змогу перейти до робочого проектування. Однак у 1965 р.

усі матеріали знову передали конструктору А.І. Мікояну. На цій базі був розроблений проект "Спіраль". У 1975 р. В.М. Челомей повертається до *ЛКЛ*. Він вважав, що *ЛКЛ* при стартовій масі 25 т вивів би на орбіту за допомогою РН "Протон" до 5 т корисного вантажу. Вважав, що такий підхід вигідніший від проекту важкого американськрго шатла. Перевагу було віддано проекту Глушка, який пропонував створити новий носій.

Помео В.М. Человей 08.12.1984 р. Варто зазначити, що не всі ідеї В.М. Челомея реалізовані, наступним поколінням конструкторів є над чим працювати.

*Михайло Кузьмич Янгель* (1911–1971) – вчений-механік, конструктор у галузі ракетно-космічної техніки. Народився у с. Зирянова Іркутської губернії у сім'ї вихідців з України. Закінчив Московський авіаційний інститут (1937 р.) та Академію авіаційної промисловості (1950 р.). Працював у Конструкторському бюро М.М. Полікарпова (літаки По). У 1950–1954 рр. – начальник відділу Науково-дослідного інституту ракетної техніки. У 1954–1971 рр. – начальник і головний конструктор СКБ "Південне" (Дніпропетровськ).

М.К. Янгель

Під його керівництвом та за участю створено кілька класів і поколінь стратегічних бойових ракет, зокрема, одно- і двоступінчасті ракети на висококиплячих компонентах палива з автономною системою керування першого покоління, двоступінчасті ракети з дальністю польоту понад 11 тис. км, ампулізована рідинна ракета зі строком перебування в заправленому стані більше п'яти років, а також твердопаливні ракети з високими техніко-тактичними характеристиками. Під час проектування бойових ракет передбачалося також їхнє використання як носіїв космічних апаратів ("Космос", "Циклон", "Зеніт"). Створив науково-конструкторську школу.

У 1959 р. ракету з новою системою керування було прийнято на озброєння з можливістю застосування як під час наземного, так і шахтного типів старту. На її основі в СРСР було створено новий рід військ – ракетні війська стратегічного призначення. У липні

1989 р. їх було знято з озброєння у зв'язку з укладенням договору про ліквідацію ракет середньої та малої дальності.

Створення першої стратегічної ракети спричинило появу нової проектно-конструкторської організації ОКБ-586 (з 1966 р. – КБ "Південне"), а також нової науково-конструкторської школи в ракетобудуванні – М.К. Янгеля. У наступні роки, з розвитком цього напряму, у школі створюють низку нових зразків балістичних ракет далекої дії.

Вперше у світовій практиці було створено ракету з головною частиною, що розділялась, та ракету СС-9 з орбітальною головною частиною. Створенням цих ракет було досягнуто паритету з США в ракетному озброєнні.

На базі бойових ракетних коплексів ще в 50-ті роки янгелівці почали розробляти ракети-носії для штучних супутників Землі – апарати "Космос" та "Циклон". Гордістю колективу стала ракета-носій "Зеніт", для якої характерна точність виведення на орбіту, що перевершує точність зарубіжних носіїв, висока надійність, рівень автоматизації робіт на стартовому комплексі, екологічна чистота. Вантажопідйомність "Зеніту" становить 13 740 кг. Не дивно, що до цього носія виявляють велику зацікавленість зарубіжні фірми.

*Павло Романович Попович* (1930–2009) – льотчик-космонавт, генерал-майор авіації (1976), кандидат технічних наук. Двічі Герой Радянського Союзу.

Народився 5.10. 1930 р. у с. Узин на Київщині. Закінчив військове авіаційне училище (1954), Військово-повітряну інженерну академію імені Жуковського (1968). Після закінчення училища служив в частинах Військово-Повітряних сил.

П.Р. Попович

З 1960 р. – в загоні космонавтів. 12–15 серпня 1962 р. виконав на кораблі-супутнику "Восток-4" перший у світі груповий політ двох пілотованих кораблів, разом з А.Г. Ніколаєвим, який пілотував космічний корабель "Восток-3". Під час групового польоту були проведені перші експерименти з радіозв'язку між екіпажами двох кораблів у космосі і взаємне фотогра-

фування, виконана широка програма науково-технічних і медико-біологічних експериментів. П. Попович провадив орієнтацію корабля в просторі за допомогою системи ручного управління. За успішне здійснення першого в світі групового космічного польоту і проявлені мужність та героїзм П.Р. Поповичу було присвоєно звання Героя Радянського Союзу.

Другий політ у космос Попович зробив 3–19 липня 1974 р. як командир екіпажу космічного корабля "Союз-14" (спільно з бортінженером Ю.П. Артюхіним). 5 липня 1974 р. "Союз-14" провів стикування з науковою станцією "Салют-3", що вже була на орбіті з 25 червня 1974 р. Сумісний політ космічного комплексу "Салют-3"–"Союз-14" тривав 15 діб. За час польоту космонавти досліджували геолого-геоморфологічні об'єкти земної поверхні, атмосферні утворення і явища, фізичні характеристики космічного простору, провели медико-біологічні дослідження з вивчення впливу чинників космічного польоту на організм людини і визначення раціональних режимів роботи на борту станції. За цей політ на орбітальній станції "Салют-3" та на космічному кораблі "Союз-14" П. Поповичу повторно присвоєне звання Героя Радянського Союзу.

За заслуги в освоєнні космічного простору удостоєний Золотої медалі ім. К.Е. Ціолковського (АН СРСР), медалі де ла Во (Франції). Йому присвоєне звання Героя Праці Соціалістічної Республіки В'єтнам. Нагороджений двома орденами Леніна, орденом Червоної Зірки і медалями, а також іноземними орденами. П.Р. Попович – був президентом уфологічної асоціації СНД, Академії енерго-інформаційних наук, головою української діаспори у Москві. Помер 30.09.2009 р.

*Леонід Констянтинович Каденюк* – перший космонавт незалежної України. Народився 28.01.1951 в с. Клішківці Хотинського р-ну, Чернівецької обл. Батько, Костянтин Микитович, та мати, Ніна Андріївна, – учителі. Освіту здобував у Чернігівському вищому військовому училищі льотчиків (1967–1971 рр.) як льотчик-інженер; у Московському авіаційному інституті (1985–1989 рр.) як інженер-механік; Центрі підготовки льотчиків-випробувачів (1977), Центрі підготовки космонавтів ім. Ю.О. Гагаріна у Зоряному містечку Московської обл.

Л.К. Каденюк

У 1977–1979 рр. пройшов загальнокосмічну підготовку як космонавт-випробувач, а також унікальну інженерну і льотну підготовку – вивчив космічні кораблі “Союз”, “Союз-ТМ”, орбітальну станцію “Салют” та частково орбітальний комплекс “Мир”. 1983–1988 рр. – льотчик-випробувач Державного науково-дослідного інституту ім. В.П. Чкалова, м. Ахтубінськ Астраханської обл. 1988–1996 рр. – космонавт-випробувач, льотчик-випробувач групи багаторазових космічних систем Державного НДІ ім. В.П. Чкалова, Зоряне містечко.

1990–1992 рр. – пройшов підготовку за повною програмою командира космічного корабля “Союз-ТМ” та за програмою командира багаторазового космічного корабля “Буран”. Брав участь у розробці та випробуваннях авіаційно-космічних систем. Льотчик-випробувач 1-го класу. Літав на понад 50 типах і модифікаціях літаків різного призначення (здебільшого – винищувачах). 1995–1997 рр. – підготовка до космічного польоту на американському багаторазовому космічному кораблі “Колумбія”, м. Київ, м. Г’юстон. 19.11–05.12.1997 рр. – виконав космічний політ на американському багаторазовому космічному кораблі спейс шатл “Колумбія”.

1998–1999 рр. – начальник управління авіації ППО Міністерства оборони України; радник Міністерства України у справах науки і технологій з питань пілотування та експлуатації літальних апаратів, літакобудування і космічних технологій. 07.1999–02.2000 рр. – помічник Президента України. 2000–2001 рр. – заступник генерального інспектора Генеральної військової інспекції при Президентові України. Почесний громадянин м. Чернівців (2001), Герой України.

*Гайдемáрі Стефанúшин-Пáйпер* (*Heidemarie Stefanyshyn-Piper*) – американська астронавтка, українка за походженням по батьковій лінії, у дитинстві відвідувала пластові табори. Народилася 7.02.1963 р. у містечку Сент-Пол штату Міннесота, США. Закінчила у 1980 р. середню школу *Derham Hall High School* у Сент-Пол. У 1984 р. закінчила Массачусетський технологічний інститут зі сту-

Г. Стефанишин-Пайпер

пенем бакалавра спеціальності машинобудування; у 1985 р. отримала ступінь магістра за тією ж спеціальністю. У червні того самого року вступила до Військово-Морських сил США, пройшла вишкіл у Вишкільному центрі. 1 травня 1996 р. прийнята до корпусу американських астронавтів (NASA-16) як кандидат на політ у складі місії. У 1998 р. закінчила підготовку та прийнята до Відділу астронавтів NASA. Перший політ виконала 9–21 вересня 2006 р. Час перебування у космосі становить 11 днів 19 год 6 хв та 35 с. Політ здійснювала в програмі "Місія STS-115" на кораблі спейс шатл "Атлантіс", що була першою космічною місією до МКС після загибелі човника "Колумбія". Г. Стефанишин-Пайпер, яка стала восьмою жінкою астронавтом НАСА, виконала вихід у відкритий космос (за історію НАСА таких виходів було 156), загальна тривалість якого становила 12 год. 8 хв.

29 січня 2007 р. відвідала Україну. Того дня перебувала у Львові, а 31 січня побувала у селах Якимів та Новий Яричів Львівської обл., де народився її батько, а також живе родина (16 двоюрідних братів та сестер). 1 лютого відбулася зустріч із Президентом України, Віктором Ющенком.

Нагороджена медаллю Navy Commendation Medal ("За заслуги"), дворазово, медаллю Navy Achievement Medal ("За досягнення"), дворазово, Meritorious Service Medal ("За визначну службу"), Орденом Княгині Ольги III ступеня ("За мужність і відвагу, виявлені в освоєнні космічного простору, зміцнення дружби між українським та американським народами").

Окрім зазначених, у космос літало багато космонавтів та астронавтів українського походження. Серед космонавтів першого двадцятиріччя польотів були: Георгій Береговий (1968), Георгій Шонін (1969), Георгій Добровольський (1971), Валерій Биковський (1976), Віталій Жолобов (1976), Георгій Гречко (1978), Олександр Романенко (1978), П. Климчук (1978), В.Ковальонок 1978, 1981, О. Іванченков (1978), Леонід Кизим (1984) та ін. Деякі з космонавтів

злітали у космос по три рази – К. Бобко, О. Волков, Ю. Гідзенко, Л. Кизим, В. Ляхов, В. Попов, а Ю. Маленченко – чотири рази.

Поміж астронавтів США та Канади українське коріння, окрім Стефанишин-Пайпер, є у таких астронавтів: Брюса-Едварда Мельника (здійснив два польоти); Роберти Бондар (перша канадська жінка-астронавт, політ 1992р.); Джудіт Різник (найкрасивіша жінка-астронавт, під час другого польоту в космос на човнику "Челленджер" трагічно загинула); Керол Бобко. Зараз до космічних польотів інтенсивно готуються вчена-біолог Надія Адамчук та Ярослав Пустовий, який бере участь у проекті підготовки суборбітальних польотів "Канадська стріла".

# Розділ 2

## ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИРОДНІ УМОВИ ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ

Перенесення різної інформації в просторі забезпечується речовинно-енергетичними потоками. Світ пронизаний потоками різних за своїми властивостями хвиль (механічних, гравітаційних, сейсмічних, звукових, речовинних та електромагнітних), які несуть інформацію про об'єкти, джерела і причини свого виникнення, про свою трансформацію на шляху від джерела до приймача. Потрібно лиш мати змогу сприймати ці хвилі і вміти зчитувати з них інформацію.

Природні джерела продукування різних хвиль супроводжують Всесвіт у процесі всього його розвитку. Вони становлять сутність його зв'язків між складовими частинами різних рангів, основу його системності, можливість його розвитку. Цими ж хвилями супроводжується й еволюція Землі загалом та окремих її організмів. Наприклад, світловими потоками інформації користуються всі живі істоти, які мають органи зору, або ті біологічні живі форми, які біохімічно реагують на світло (фотосинтез рослин), а також ті живі і "неживі" субстанції, які здатні до фотохімічного реагування (вода, гумус, фотоплівки, фоторезистори, фотополімери, чи ті тіла, які здатні поглинати світло, перетворювати його на тепло і тим започатковувати в собі та в оточенні теплоенергетичні процеси – теплове поглинання, випромінювання, випаровування, вивітрювання, циркуляції)[1].

---

[1] Дотримуємось погляду, що "життям" буває не тільки біологічне, але й суспільне, хімічне, фізичне, навіть математичне, тобто це процес функціонування за певними правилами чи законами.

*Головним джерелом випромінювання електромагнітних хвиль (ЕМХ)* у Сонячній системі є *Сонце*, від якого виходить цілий "акорд" хвиль, що охоплює весь відомий спектр ЕМХ. Випромінені ним хвилі поширюються в усіх напрямах, частково доходять до Землі, зазнають трансформацій в атмосфері, відбиваються наземними поверхнями, передають їм свою енергію, активують їх, формуючи величезну різноманітність нових випромінюючих об'єктів. Випромінювання кожного з цих об'єктів відповідає їхнім властивостям, модифікується їхніми станами, що змінюються з часом, а тому несе інформацію про самі об'єкти та про їхні стани, що зумовлює можливість розрізнення, прочитання та тлумачення.

Інші природні джерела світла, яке приходить до поверхні землі, порівняно з Сонцем є слабкими (табл. 2.1).

*Таблиця 2.1*

Джерела енергії в атмосфері (величини енергії визначені для Землі загалом) [54]

| Джерело енергії | Енергія в ерг/с | Енергія по відношенню до Сонця |
|---|---|---|
| Сонце | $1{,}76 \times 10^{24}$ | 1 |
| Місяць (повний) | $3{,}09 \times 10^{19}$ | $1{,}76 \times 10^{-5}$ |
| Блискавки | $1{,}60 \times 10^{19}$ | $9{,}09 \times 10^{-6}$ |
| Світло зірок | $2{,}61 \times 10^{17}$ | $1{,}48 \times 10^{-7}$ |
| Яскраві полярні сяйва | $2{,}53 \times 10^{17}$ | $1{,}44 \times 10^{-7}$ |
| Космічні промені | $1{,}63 \times 10^{17}$ | $9{,}26 \times 10^{-8}$ |
| Метеори | $1{,}44 \times 10^{17}$ | $8{,}18 \times 10^{-8}$ |
| Світіння нічного неба | $1{,}12 \times 10^{17}$ | $6{,}37 \times 10^{-8}$ |

*Другим джерелом* (групою, сукупністю джерел) випромінювання ЕМХ на Землі є власне випромінювання земної поверхні, тобто тих субстанцій, які становлять її радіаційно-активний шар (РАШ).

*Третьою групою джерел* випромінювання є штучні випромінювачі ЕМХ: генератори, які створила людина, джерела гамма-, рентгенівських, світлових, теплових та радіохвиль.

Джерелами випромінювання електромагнітних хвиль є змінні в часі електричні струми, а також окремі електрично заряджені частинки, що рухаються прискорено.

Таким чином, від Землі, усіх навколишніх об'єктів, від нас самих, від космічних об'єктів в усіх напрямках поширюються ЕМХ

різної природи та потужності, тобто ми живемо в середовищі, густо пронизаному ЕМХ. Більшості з них людські органи чуття не сприймають, а тому не можуть бути опрацьовані мозком людини безпосередньо і не можуть бути зрозумілими з урахуванням своїх природних відчуттів. З цією метою людство придумало безліч пристроїв, які поступово трансформували до сьогоднішніх можливостей дослідження космосу із Землі і дослідження Землі з космосу.

Людство використовує лише частину хвиль, бо це обмежено його фізіологічними, психологічними чи технічними можливостями. Дистанційне вивчення космосу за допомогою світлових хвиль люди здійснюють вже від початку свого виникнення як біологічного виду, а дистанційне вивчення Землі з повітря почалося від початку можливості літати в повітрі, а з космосу – від перших польотів у космос та від винайдення спеціальної апаратури.

Отже, дистанційне зондування Землі з космосу, а також космічних об'єктів із Землі можливе саме тому, що існує такий носій інформації, як хвилі (механічні, акустичні)[2], але передусім – електромагнітні хвилі (ЕМХ). Тому вважають, що *фізичною основою дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є електромагнітні хвилі (ЕМХ).*

## 2.1. Природа електромагнітного випромінювання

*Електромагнітні хвилі (ЕМХ)* – це процес поширення у просторі перемінного електромагнітного поля. Воно складається з електричних та магнітних полів, які періодично змінюються, поширюються від коливного заряду, являючи собою хвильовий процес. Вектори електричного і магнітного коливань є взаємно перпендикулярними і перпендикулярними до напрямку поши-

---

[2] Швидкість поширення хвиль у середовищах різна: звукових хвиль у повітрі – при 0° С – 331 м/с, у воді при 8° С – 12 435 м/с, у сталі при температурі 15° С – 4 980 м/с.
Швидкість світла в повітрі – 299 796 ±4 км/с, у склі - – 200 000 км/с.

рення хвилі. Швидкість поширення ЕМХ ≈ 300 000 км описують формулою Максвела:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \ .$$

де $\boldsymbol{\varepsilon}$ $\boldsymbol{\mu}$ – відносні електрична і магнітна проникності середовища, $\boldsymbol{c}$ – швидкість світла у вакуумі.

Оскільки проникність усіх неферомагнітних середовищ мало відрізняються від одиниці, то швидкість їхнього поширення буде дорівнювати швидкості світла, що стало одним із доказів хвильової природи світла.

Якщо йдеться про світло, то його ЕМХ поширюються у формі хвиль або прямолінійного потоку світлових часток – фотонів. Згідно з цим поширення ЕМХ можна описати або специфічними хвильовими параметрами – швидкістю поширення, довжиною хвилі та її частотою, або поняттями корпускулярної теорії – як потік світлових квантів чи фотонів.

Подвійна природа електромагнітного випромінювання простежується на прикладі сонячного випромінювання. Доказом його хвильової природи слугує явище інтерференції[3] (наприклад, різні світлові, кольорові переміни чи картинки, які видно на мильних бульбашках, або нафтових чи оливних плямах на воді). Корпускулярна природа світла проявляється під час потрапляння його на фотоелемент, у якому виникає електричний імпульс, пропорціональний кількості світла, тобто числу фотонів або квантів світла. Подібним прикладом може служити фотоплівка, скрите зображення на якій формується залежно від кількості фотонів, які потрапили на світлочутливі зерна фотографічної емульсії.

Характер усіх ЕМХ однаковий. Вони поширюються у вакуумі з швидкістю світла, але відрізняються одна від іншої довжиною хвилі, частотою коливання та енергією, яку вони переносять. Весь набір ЕМХ складає впорядкований спектр ЕМХ.

---

[3] І*нтерференція* – взаємне посилення та ослаблення хвиль при накладанні їх одна на одну. Результат інтерференції в кожній точці простору залежить від різниці фаз хвиль, що накладаються. Інтерферувати можуть тільки когерентні хвилі, тобто хвилі, для яких різниця фаз не змінюється з часом.

Головними характеристиками ЕМХ є довжина хвилі та її частота.

*Довжина хвилі* – це прямолінійна відстань між двома сусідніми пунктами повторення однієї фази (наприклад між двома сусідніми максимумами чи сусідніми мінімумами траєкторії коливання). По суті, це є віддаль, яку проходить хвиля за проміжок часу, який дорівнює одному коливанню. Довжини хвиль дуже різноманітні і плавно змінюються від наномікронів до метрів та кілометрів, навіть десятків кілометрів. Ця різноманітність послідовна, умовно безперервна, але її ділять на ряд частин – областей, зон, чи діапазонів, що через зміну своїх довжин і частот набувають специфічних властивостей: гамма-промені, бета-, альфа-, рентгенівські, ультрафіолетові, видимі (зорові, світлові) промені, інфрачервоні та радіохвилі різних груп. Кожну із зазначених зон також поділяють на діапазони – умовні підрозділи, які через свою природу володіють відмінними властивостями.

*Частота хвилі* – це кількість повних коливань, які здійснює хвиля за одну секунду. Чим коротші хвилі, тим більша в них частота. Між довжиною хвилі ($\lambda$) і її частотою є прямий зв'язок, бо довжина хвилі дорівнює швидкості хвилі ($c$), поділеній на її частоту ($f$):

$$l = c/f.$$

Частоту випромінювання вимірюють у герцах (*Гц).* 1 Гц – це одне повне коливання за 1 с. Частоти змінюються від одиниць герців для звукових хвиль[4] і дуже довгих (наддовгих) радіохвиль до кілогерців ($10^3$ Гц), мегагерців ($10^6$ Гц) і гігагерців ($10^9$ Гц) в середніх, коротких та ультракоротких радіохвилях і до тера- пета- та ексагерців ($10^{18}$Гц) і більше в оптичних, рентгенівських та гамма-хвилях .

Довжини хвиль і їхні частоти поділені згідно з міжнародними угодами, де вирізняються хвилі радіо, оптичної, рентгенівської та інших зон (рис. 2.1).

Важливими параметрами коливних процесів є також період коливання та амплітуда коливання. *Період коливання* – час, протягом якого здійснюється одне коливання.

---

[4] *Звукові механічні хвилі* з частотами від 16 до $2 \times 10^4$ Гц сприймають людські вуха. Частоти нижчі від 16 Гц називають інфразвуком, вищі від $2 \times 10^4$ Гц – ультразвуком, а з частоти від $2 \times 10^9$ до $2 \times 10^{13}$Гц – гіперзвуком.

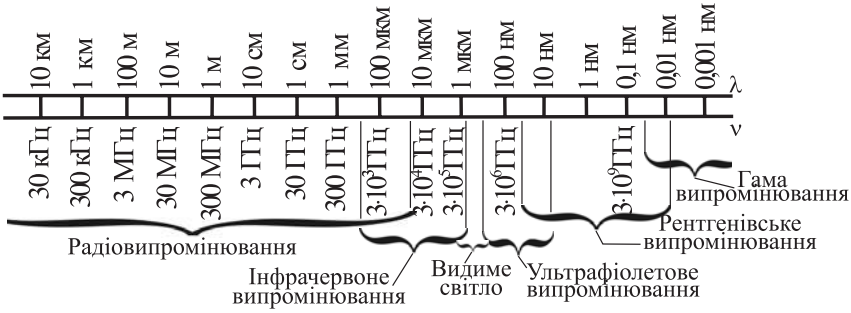



Рис. 2.1. Шкала частот і довжин електромагнітних хвиль.:
1 ГГц = $10^3$ МГц= $10^9$ Гц; 1 нм = $10^{-3}$ мкм = $10^{-9}$ м.

*Амплітуда коливання* – це величина, яка дорівнює найбільшому значенню величини коливання (інтенсивність коливання). З амплітудою коливання пов’язана величина енергії потоку хвиль (наприклад, сила, інтенсивність звуку при певній амплітуді коливання струни чи камертона).

З природних джерел електромагнітного випромінювання значно поширені і вивчені теплові, світлові та радіо хвилі, хоч останнім часом наголошують на електромагнітному випромінюванні, що виникає під час землетрусів, сходу снігової лавини, переміщення льодовиків.

*Поширення ЕМХ пов’язано з переносом енергії електромагнітної хвилі,* подібно до того, як поширення інших хвиль у речовині (звукові, сейсмічні, вітрові) також пов’язані з переносом енергії. Енергія переноситься в напрямку поширення хвилі.

Інтенсивність ЕМХ пропорціональна середньому значенню добутку модулів векторів електромагнітного поля, тобто квадрату напруженості.

В основі теорії теплового випромінювання тіл лежать закони випромінювання *абсолютно чорного тіла*[5] – ідеального гіпотетич-

[5] Абсолютно чорним називають тіло, яке повністю поглинає випромінювання всіх довжин хвиль, які на нього потрапляють. Коефіцієнт поглинання дорівнює одиниці. Абсолютно чорне тіло випромінює більше енергії, ніж будь-яке інше (не абсолютно чорне) тіло при однаковій температурі.

ного випромінювача і поглинача, який поглинає все падаюче на нього випромінювання, нічого не відбиваючи, не пропускаючи, і випромінює максимальну енергію при даній температурі.

Згідно з законом Кірхгофа випромінювальна здатність тіла пропорціональна поглинальній його здатності при тій самій температурі. Теза про те, що випромінювальна і поглинаюча здатність тіл стосовно ЕМХ повинна стосуватись до конкретної, однієї тієї ж температури, є дуже важливою, бо від цього залежать висновки під час порівняння зафіксованого при ДЗЗ випромінювання від різних поверхонь. Якщо однаково нагріті дві поверхні тіл випромінюють однаково, то вони ідентичні, а якщо по-різному, то вони неідентичні. Якщо ж два однакові тіла випромінюють з різною інтенсивністю, то вони відрізняються нагрівом – температурою.

Об'єкти, які трапляються в природі, не є ідеальними випромінювачами. Їхня випромінювальна здатність, яка *не може бути більшою, ніж в абсолютно чорного тіла,* характеризована коефіцієнтом "чорноти", завжди меншим від одиниці (закон Кірхгофа). Під час нечорного ("сірого") випромінювання форма кривої спектрального розподілу енергії подібна до кривої абсолютно чорного тіла

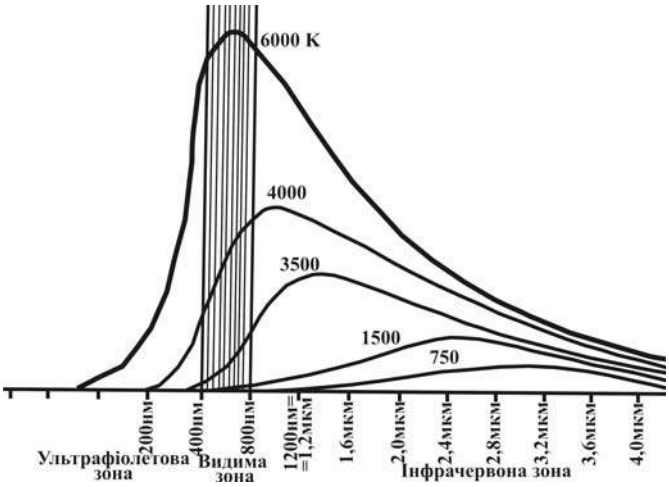



Рис. 2.2. Розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла при різних температурах: по осі ординат відкладена інтенсивність випромінювання, по осі абсцис – довжина хвиль [69].

(кривої Планка), але інтенсивність – менша. Під час селективного випромінювання такої подібності не простежується.

При низьких температурах більшість тіл, у тім числі абсолютно чорне, мають низькі рівні випромінювання. При їхньому нагріванні спочатку зростає випромінювання в інфрачервоному (тепловому) діапазоні, а при більшому нагріванні максимум випромінювання зміщується до коротких хвиль.

Сильно нагріті тіла (спіраль електричної лампочки) починають світитися червоним, а розжарені – ще коротшими (оранжевими, жовтими) хвилями видимого спектра. Електродуга під час електрозварювання має значну частку синіх, фіолетових та ультрафіолетових променів (рис. 2.2).

***Електромагнітний спектр.*** Всю послідовність з відповідними йменуваннями та класифікаціями електромагнітних хвиль за їхніми довжинами або частотами називають *спектром електромагнітних хвиль* (рис. 2.3).

Електромагнітні хвилі різних випромінювань займають цілком певні ділянки в спектрі.

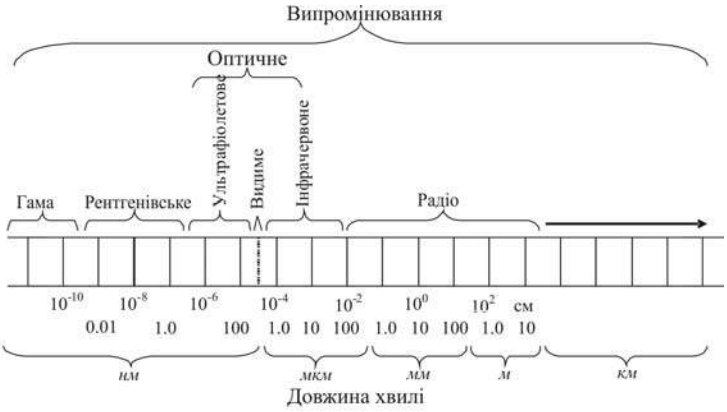



Рис. 2.3. Схема спектра електромагнітних хвиль ДЗЗ.

Найчастіше використовують в аерокосмічних методах електромагнітні коливання, що належать до зон оптичних хвиль і ультракоротких радіохвиль. Інші хвилі, які ми коротко охарактеризуємо, використовуються в космічних технологіях. Головне, що вони присутні в спектрі випромінювання Сонця і, якщо й не

використовуються (поки що )в методах ДЗЗ, то все ж впливають на атмосферу Землі, наземні об'єкти, товщу Землі, викликаючи зміну їх властивостей, а останні, як наслідок, модулюють відбиті ЕМХ та впливають на власне випромінювання (РАШ земної поверхні).

Гамма-хвилі ($\gamma$-хвилі) є випромінюванням, що супроводжує розпад радіоактивних елементів.

При цьому процесі виділяються також ***α-*** та ***β-***промені.

***α****-промені,* ***α-****частинки* – це позитивно заряджена складова радіоактивного розпаду ядер атомів гелію. Відхиляються магнітним полем, мають дуже малу проникну здатність: аркуш паперу товщиною 0,1 мм для цих променів – непрозорий[6].

***β-****проміння,* ***β***-частинки – негативно заряджена складова радіоактивного розпаду, електрони, що рухаються з великими швидкостями, близькими до швидкості світла. У магнітному полі сильно відхиляються в протилежний бік від ***α*** -частинок. Мають більшу проникну здатність: непрозорою для них може бути алюмінієва пластинка товщиною в кілька міліметрів.

$\gamma$*-проміння* – незаряджена (нейтральна) складова проміння радіоактивного розпаду, не відхиляється в магнітному полі, має високу проникну здатність: шар свинцю товщиною 1см не перешкода для цих променів, але зменшує їхню інтенсивність у два рази. Довжина цих хвиль дуже мала – від $10^{-8}$ до $10^{-11}$ см[7], чим і зумовлена її проникна здатність через речовини, бо це проникність через структуру атома. Швидкість їхнього поширення така ж, як і в інших ЕМХ (близька до швидкості світла у вакуумі).

*Рентгенівське випромінювання* – катодне випромінювання, яке виникає від потоків швидких електронів під час їхнього гальмування перед будь-якою перешкодою. Має довжину хвилі більшу, ніж гамма – промені і меншу, ніж ультрафіолетові промені (близько $10^{-8}$ см, тобто відповідає розміру атомів). Електромагнітне поле не впливає на напрям їхнього поширення. Рентген-промені за-

---

[6] Резерфорд встановив, що ***α-*** частинки є ядрами атома гелію.

[7] Розмір атома має близько $10^{-8}$см, а розмір ядер різних елементів – $10^{-12}$–$10^{-13}$ см, тобто в 10–100 000 разів більший від розмірів ядра, а це великий простір для проникнення, проходження $\gamma$*-проміння* крізь атоми.

світлюють фотоматеріали, проникають через м'які живі тканини, іонізують повітря, тощо.

***Оптичні хвилі.*** *Частина ультрафіолетових (ближні), світлові та інфрачервоні (фотографічні) становлять групу оптичних хвиль, які* поширюються за законами оптики.

*Ділянка оптичних хвиль* (0,001–1 000 мікрометра) охоплює: ближній ультрафіолетовий (0,001–0,4 мкм), видимий (0,4–0,8 мкм) та інфрачервоний (0,8–1 000 мкм) діапазони.

В ультрафіолетовому діапазоні виділяють ближню (400–300 нанометра), середню (300–200 нм) і дальню (200–1 нм) області (рис. 2.3).

Ультрафіолетове проміння в далекій зоні дещо наближається за властивостями до рентгенівських променів, бо має здатність проникати в м'які тканини на невелику глибину (зміна пігментації шкіри під час загоряння під опроміненням сонця чи кварцових ламп).

Зоровий (світловий, видимий) діапазон, у якому око здатне виокремлювати кольорові відмінності, поділяють на кольорові зони з такими назвами кольорів і їхніми межами, (нм) :

- фіолетовий (390–450),
- синій (450–480),
- блакитний (480–510),
- зелений (510–550),
- жовто-зелений (550–575),
- жовтий (575–585),
- оранжевий (585–620),
- червоний (620–800).

У зарубіжній літературі прийнято виділяти ще червоно-інфрачервону зону (700–800 нм). Зі зростанням довжини інфрачервоні хвилі (вже в середньому та далекому діапазонах) набувають властивостей радіохвиль, а тому не заломлюються лінзами (не фотографуються), а сприймаються радіоантенами та виділяються радіоприймачами.

Світлові промені – зоровий діапазон ЕМХ – діапазон, який сприймають людські очі. Тіла, які ми бачимо без їхнього стороннього освітлення, тобто тіла, що самі випромінюють світло, називають джерелами світла.

Для світла властиві:

1. *Закон прямолінійного поширення світла: в однорідному середовищі світло поширюється прямими лініями*. З ним пов'язані явища

освітленості і тіні. *Освітленість нормальної поверхні*[8] прямо пропорційна силі джерела світла і обернено пропорційна квадратові віддалі від нього до освітлюваної поверхні. *Освітленість поверхонь* прямо пропорційна синусові кута падіння променя на цю поверхню.

2. *Закон відбивання світла* (частина променів, що потрапили на предмет, відбиваються від нього). *Кут відбивання дорівнює куту падіння.* Відбитий промінь лежить у тій самій площині, що і перпендикуляр до відбиваючої поверхні, поставлений у точці падіння променя. Поверхні з різними властивостями можуть відбивати світло дифузно чи дзеркально, або з різними співвідношеннями цієї якості.

3. *Закон заломлення світла* (під час проходження світла через прозорі середовища на контакті цих середовищ промені заломлюються). *Заломлений промінь лежить у тій самій площині, що й падаючий промінь та перпендикуляр, поставлений до поверхні в точці падіння на межі відокремлення двох середовищ. При всіх змінах кута падіння і заломлення відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для даних середовищ є величиною сталою. Цю величину називають показником заломлення другого середовища відносно першого.* (Наприклад, показник заломлення червоного світла відносно повітря для води дорівнює 1,33, для кам'яної солі – 1,46, для скла (легкий флінтглас) – 1,60, для алмазу – 2,40).

Більше заломлення виявляється в тих середовищах, у яких швидкість світла менша, тобто в яких є більшою *оптична щільність*.

Контакти середовищ з різною оптичною щільністю, крім заломлення, також відбивають світлові промені, тобто розділяють світло на відбите і заломлене, що пройшло вглиб другого середовища. Чим більший кут заломлення, тим більше світла відбивається. У разі однакової оптичної щільності двох середовищ відбиття світла може взагалі не простежуватись і контакту цих поверхонь можна не побачити (наприклад, скляна паличка в кедровій олії виглядає незломленою).

При кутах падіння світлових променів, близьких до нормалі, поглинається світла менше, ніж відбивається. Тобто, в екваторіальних водах при певній величині прозорості світло сонця проходи-

[8] Термін "нормальна поверхня" вживають для означення поверхонь, перпендикулярних до напрямку променів.

тиме на більшу глибину, ніж на інших широтах. Це позначається на якості підводного знімання. При зменшенні кута падіння сонячних променів зростає частка відбитого проміння, і це зростання можливе аж до повного відбивання (сонячна доріжка на воді при заході сонця). За цих умов на знімках з'являються відблиски, які заважають розглянути поверхню.

Прозорі для світла тіла, обмежені з двох сторін сферичними або іншої форми поверхнями, називають *оптичними лінзами*. Опуклі поверхні лінз збирають промені, а ввігнуті – розводять (розсіюють). Віддаль між оптичним центром лінзи і пунктом на головній оптичній осі, де перетинаються бокові промені, називають *фокусною*. Частка від ділення одиниці на фокусну віддаль характеризує оптичну силу лінзи в діоптріях[9].

*Фокусна віддаль* – важлива властивість окремих лінз та їхніх пакетів – об'єктивів оптичних пристроїв. На властивостях лінз працюють окуляри, лупи, об'єктиви всіх оптичних апаратів (мікроскопів, телескопів, фотоапаратів, аерофото- і космофотоапаратів, телевізійних знімальних апаратів, відеокамер, сканерів).

У природі, зокрема в атмосфері, можуть формуватися постійні чи тимчасові лінзи, сформовані з різнонагрітого повітря, різнозволоженого повітря, з дифузних крапельок води, кристаликів снігу і т.п., які приводять до формування оптичних явищ (райдуга, гало, стовпи, міраж, глорія), а при ДЗЗ – до тимчасового підсилення світла і зміни масштабу зображень.

Оптичним хвилям властиві також явища інтерференції, дифракції та дисперсії.

*Явище інтерференції* виникає під час накладання двох пучків світла, що виходять з різних джерел, тобто може відбуватися взаємне посилення або послаблення в певних пунктах простору, наприклад, на фокальній площині з фотоплівкою під час фотографування, а ще частіше на фокальній площині та дисплеях цифрових фотоапаратів. При цьому виникають регулярно, закономірно розташовані темні та світлі правильної форми ділянки для хвиль однієї довжини чи кольорових дуг для білого світла, що є сумішшю світлових хвиль різних довжин.

---

[9] За одиницю оптичної сили лінзи приймають оптичну силу такої лінзи, фокусна віддаль якої дорівнює 1м. Таку одиницю називають діоптрією. Дві діоптрії має лінза з фокусною віддаллю 0,5 м.

*Суть явища дифракції* – полягає в обгинанні перешкод, які виникають на шляху променів, тобто це є деякий відступ від закону прямолінійного поширення світла і "загинання" світла в ділянку тіней.

*Дисперсія світла* – розкладання білого світла, яке проходить через призму, на кольори. Подібний ефект дають капельки води в повітрі під час виникнення райдуги.

Уразі потрапляння світла на світлочутливі речовини виникає певна його зміна, яку *називають фотоефектом.* На фотохімічних ефектах ґрунтується фотографія на світлочутливих емульсіях. На фотофізичних ефектах – робота фоторезисторів[10], фотореле, фотоелементів, явище фотоструму, функціонування у сонячних батарей.

***Діапазон інфрачервоного (ІЧ) випромінювання*** поділяють на піддіапазони ближнього (0,8–1,5 мкм), середнього (1,5–3 мкм) і дальнього (3–1000 мкм) інфрачервоного випромінювання. У ближньому і середньому піддіапазонах переважає відбите (сонячне) випромінювання, а в дальньому, яке називають тепловим, власне (теплове) випромінювання Землі. Ділянку спектра, де ще можливе застосування фотоматеріалів, яка охоплює ближній інфрачервоний піддіапазон і частину видимого діапазону, іноді об'єднують у *фотографічну інфрачервону область* (700–1 500 нм), виділяючи в ній ближню (700–900 нм), середню (900–1 100 нм) і дальню (1 100–1 500 нм) зони. Хвилі довжиною 0,1–1 мм часто називають субміліметровими.

З дією світла пов'язано багато процесів, які відбуваються в речовинах, організмах чи їхніх частинах, в технічних пристроях, які використовують під час ДЗЗ:

• фотоскопія, фотографія, фотометрія, фотограмметрія;

• у наземних процесах – фотоліз, фотосинтез, фотоперіодизм, фототропізм[11], фотонастія[12], фототерапія, фотореактивація фотолюмінісценція; фотохромія;

---

[10] Пристрій для зміни опору в електричному колі при зміні кількості світла.

[11] Фототропізм – зміна напрямів росту органів рослин під впливом односторонньої дії світла.

[12] Фотонастія – рух органів рослин, спричинений зміною інтенсивності освітлення (наприклад, розкривання і закривання квіток).

• у технічних пристроях – фотоефект, фотокатод, фотодіод, фоторезистор, фотореле, фототрансформатор, фототипія (ксерокопія, фотосканер), фототелеграфія.

Світитися можуть іонізоване повітря (полярне сяйво), інші гази в електричному полі (лампи денного світла, неонові лампи), продукти розкладу, гниття – (фосфоресценція), деякі живі організми, наприклад, фотобактерії, які продукують речовини, під час окислення яких випромінюється світло (світіння моря).

Всі тіла, що мають температуру вищу від абсолютного нуля, випромінюють у простір теплову енергію, тобто є джерелами теплового (інфрачервоного) випромінювання. Це майже всі тіла земної поверхні. Тіла, що сильніше поглинають ЕМХ, сильніше нагріваються, а тому й сильніше випромінюють, хоча характеристики випромінювання залежать також від інших (крім температури) властивостей самих тіл. Тверді тіла починають світитися при температурі, більшій ніж 500° С. Спектр випускання його – червоний. З підвищенням температури з'являються інші кольори – оранжевий, жовтий, зелений, голубий, фіолетовий. При білому розжаренні виникає суцільний спектр, від червоної до фіолетової частини. Такими є спектри свічки, костра, електролампи, металу в ковальському горнилі, розплаву чавуну, вулканічної магми в момент виверження, блискавки і т.п. Під час додавання в біле (безбарвне) полум'я солей хімічних елементів отримуємо певні забарвлення, бо хімічним елементам властивий свій спектр випускання, випромінювання світла.

За допомогою скляної призми біле світло можна розкласти на спектр кольорів. Так само поступають з забарвленим світлом (полум'ям), але тоді отримують концентровані смуги певної барви, кожна з яких відповідає вузькій ділянці випромінювання, властивій для певного хімічного елемента (наприклад жовта смуга для натрію). На цьому ґрунтуються спектроскопія і спектрометрія. Під час дистанційного зондування також застосовують дистанційні спектрометрію та спектрографію, зокрема спектрозональну і багатозональну фотографії та телевізійні багатозональні знімання і сканування.

***Радіовипромінювання.*** *Радіохвилі* різної довжини розповсюджуються з однаковою швидкістю – швидкістю світла, підкоряються загальним фізичним законам відбиття, заломлення, поляризації, хоч мають свої особливості поширення в просторі.

*Ділянку спектра (1–10 000 мм), яка зайнята ультракороткими радіохвилями, прийнято розбивати на діапазони міліметрових, сантиметрових, дециметрових і метрових радіохвиль. Сантиметрові і дециметрові хвилі часто об'єднують у діапазон радіохвиль надвисоких частот (НВЧ). В іноземній літературі міліметрові і сантиметрові хвилі зачислюють до одного діапазону, який називають мікрохвильовим* (табл. 2.2).

*Таблиця 2.2*

Класифікація радіохвиль за довжиною і частотою [111]

| Назва хвилі | Діапазон частот у (Гц) | Діапазон довжин у хвиль (м) |
|---|---|---|
| Наддовгі | $<3 \times 10^{4}$ | >10 000 |
| Довгі | $3\times10^{4} – 3\times10^{5}$ | 10 000–1000 |
| Середні | $3\times10^{5} – 3\times10^{6}$ | 1000–100 |
| Короткі | $3\times10^{6} – 3\times10^{7}$ | 100–10 |
| Ультракороткі метрові | $3\times10^{7} – 3\times10^{8}$ | 10–1 |
| Ультракороткі дециметрові | $3\times10^{8} – 3\times10^{9}$ | 1–0,1 |
| Ультракороткі сантиметрові | $3\times10^{9} – 3\times10^{10}$ | 0,1–0,01 |
| Ультракороткі міліметрові | $3\times10^{10} – 3\times10^{11}$ | 0,01–0,001 |

Хвилі радіодіапазону активно використовують у радіоастрономії для зондування Всесвіту, сприйняття радіовипромінювань від астрономічних об'єктів. У ДЗЗ радіохвилі застосовують здебільшого в радіометричному зніманні (інфрачервоний та надвисокочастотні діапазони) для визначення характеристик температури і вологозабезпечення, в радіолокаційному зондуванні льодового та снігового покривів, характеристик рельєфу, в радіогеографії для дослідження радіогеосистем – хвилі надвисокочастотні $10^{-8}$–$10^{-11}$ Гц (*сантиметровий* діапазон).

Весь радіозв'язок між наземними і космічними технічними системами, в тім числі GPS-приймачі, мобільний зв'язок та побутові радіоприймачі базуються на радіохвилях. Хвилі різної довжини можуть нести різну інформацію: в *дециметровому* діапазоні може бути переданий відеосигнал, (телебачення), а на довших хвилях (*метровий* діапазон) звукові сигнали[13].

[13] Фактично передавачі звуку випромінюють сигнал високої, надзвукової "несучої" частоти, промодульований по амплітуді звуковою частотою. Приймач цього сигналу має здатність їх розділити, виокремити, підсилити і подати на звукові динаміки.

Для безконтактної передачі і приймання сигналу використовують антени. Ефективність антен залежить від їхнього розташування, а також і від пристосування до довжини хвиль[14] та завдань зв'язку. Метрові радіохвилі (10–15 м) проходять через нижні шари атмосфери, але відбиваються від іонізованих шарів іоносфери, що служать природним ретранслятором (рис. 2.4).[15]

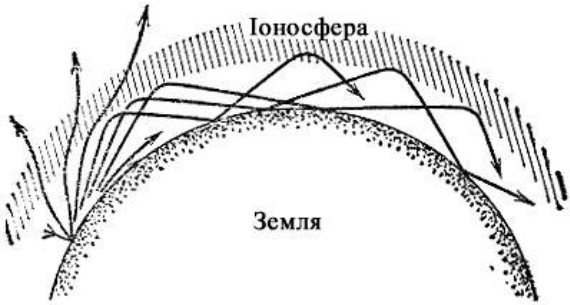



Рис. 2.4. Схема відбиття
радіохвиль метрового діапазону іоносферою [69].

Серед усіх вище охарактеризованих електромагнітних хвиль *для дистанційного зондування найчастіше використовують* – зоровий (видимий чи світловий) з довжинами хвиль від 0,4 до 0,78 мкм, ближній інфрачервоний фотографічний (0,78–0,9 мкм), інфрачервоний тепловий (3,5–5,0 та 8,0–14 мкм), а також ультрафіолетовий (0,27–0,4 мкм) та мікрохвильовий (0,3–10–30 см) спектри ЕМХ (рис. 2.5).

Довші радіохвилі використовують для радіозв'язку між космічними та наземними апаратами, що задіяні в ДЗЗ.

---

[14] Через те, що сантиметрові і дециметрові хвилі можуть поширюватися тільки лінійно, антени ставлять на високих вишках, а для передачі на великі відстані вибудовують ланцюги вишок (радіорелейний зв'язок), або системи антенних щогл висотою 20–60 м, розташованих рівномірно, "шахматно" на відстані одна від другої приблизно 10–40 км за зразком бджолиних чарунків (сот) – мобільний зв'язок.

[15] У космос запущені також штучні супутники-ретранслятори, на які сигнал передається наземними параболічними випромінювальними антенами. Відбитий від них сигнал приймають наземні приймальні параболічні ("сателітарні") антени.

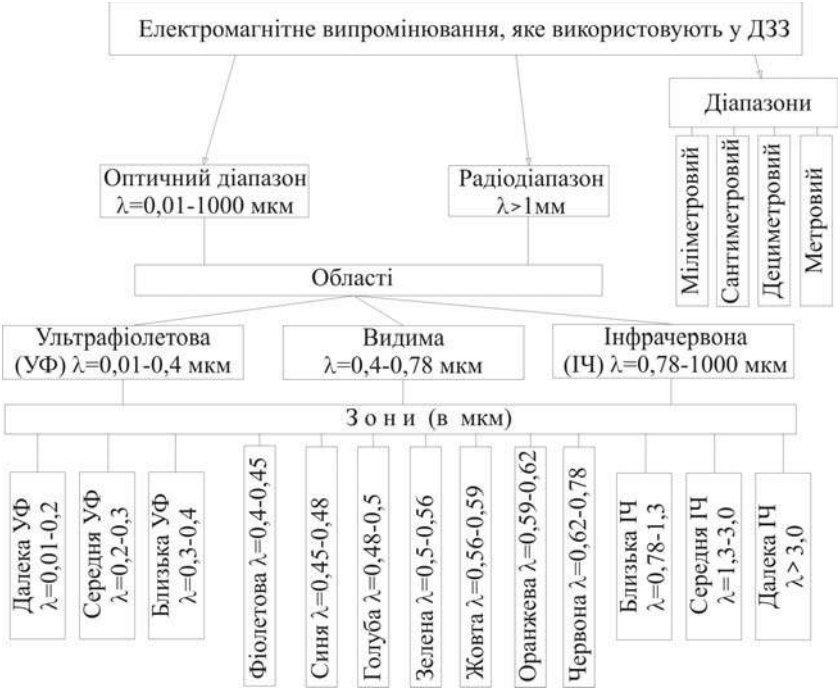



Рис. 2.5. Схема поділу спектра електромагнітних хвиль, які використовують у дистанційному зондуванні Землі.

## 2.2. Взаємодія сонячного випромінювання із Землею

### *2.2.1. Сонячне випромінювання і його проходження через атмосферу*

Сонце посилає на Землю широкий суцільний спектр електромагнітних хвиль, але земна атмосфера пропускає тільки частину з них у спектральному інтервалі від 0,3 мкм до 20 м. Інтенсивність різних спектральних променів неоднакова. Основну енергію несуть сонячні промені з довжинами хвиль 0,3–3 мкм (рис. 2.6). Випромінення Сонця майже без змін доходить до верхньої межі атмосфери Землі. За межами атмосфери інтенсивність сонячної радіації змінюється мало також

і в часі, через що її називають “сонячна стала”. Вона дорівнює 1 382 Дж/м$^2$ с, або 345,5 Вт/м$^2$.[16]

Найсуттєвіше поглинання $\gamma$–променів та жорсткої (далекої) ультрафіолетової радіації відбувається вже у верхніх шарах атмосфери, в термосфері, на висотах 100–200 км над земною поверхнею. У стратосфері, шарі максимальної концентрації озону (висота 20–50 км), додатково поглинається ще частина ультрафіолетової радіації, шкідливої для живих організмів.

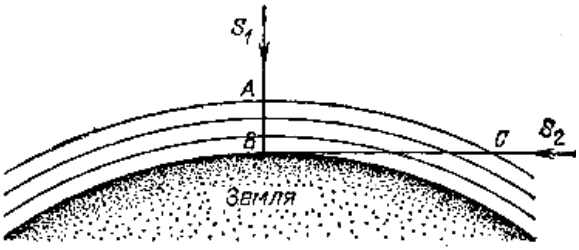



Рис. 2.6. Порівняння довжини шляху сонячного променя при позиції Сонця в зеніті ($S_1$) і на горизонті ($S_2$) [69].

Ослаблення сонячного випромінювання, яке доходить до поверхні Землі залежить від довжини шляху через атмосферу, здебільшого через тропосферу. При збільшенні кута висоти Сонця цей шлях скорочується, а при зменшенні – зростає. З огляду на це в розрахунках вживають таку величину, як атмосферна маса[17]. На широтах 45–55° від обідньої пори до вечора шлях сонячного променя через атмосферу зростає приблизно в 5 разів, що становить п’ять атмосферних мас (рис. 2.6). Особливо швидко зростає кількість атмосферних мас на приполярних географічних широтах, що перевищують $\phi$ = 60°.

[16] Один джоуль 1 Дж = 0,239 кал.

[17] *Атмосферна маса* – термін, вживаний в актинометрії, не має нічого спільного з уживаним у фізиці трактуванням терміну “маса”. Маса в цьому випадку є безрозмірною величиною, яка вказує, у скільки разів оптична товщина атмосфери в завданому напрямку перевищує оптичну товщину атмосфери по вертикалі, яку приймають за одиницю. Під час розрахунків приймають деяку атмосферу, яка має “стандартну прозорість” при тиску 1000 мб. Реальна атмосфера над місцем спостережень завжди змінна і за прозорістю, і за щільністю, чи атмосферним тиском. Кількість атмосферних мас – коефіцієнт, який уживають при наближених розрахунках.

Інтенсивність випромінювання Сонця у світловому діапазоні майже незмінна в часі, а в ультрафіолетовому і радіодіапазонах коливається залежно від "сонячної активності"[18].

У сонячній освітленості поверхні Землі виокремлюють три складові: *освітленість прямою радіацією, розсіяною радіацією небозводу і відбитою земними об'єктами*. Сумарну освітленість у літній час, головно визначають двома першими чинниками. Суму прямої та розсіяної радіації називають *сумарною* радіацію (рис. 2.7).

Співвідношення прямої і розсіяної радіації залежить від чистоти атмосфери. Частка розсіяної радіації зростає при підвищеному вмісті в атмосфері вологи (водяної пари) і пилу, а отже, більше розсіює сонячні промені тепле повітря, яке вміщує більше вологи. Освітленість наземних об'єктів може зростати також при розрідженій купчастій хмарності, яка багаторазово віддзеркалює в усі боки сонячне світло.

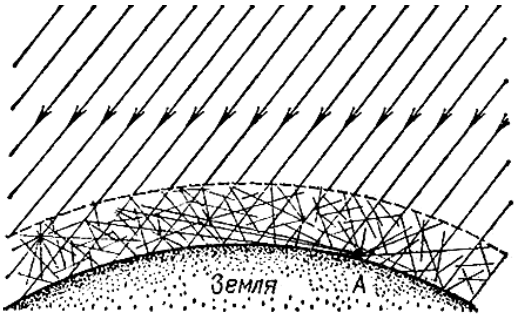



Рис. 2.7. Схема розсіювання прямих сонячних променів в атмосфері (світіння неба) та від наземних об'єктів (пункт А).

Відбитий від наземних об'єктів потік світла називають *відбитою* радіацією. Різниця між сумарною і відбитою радіаціями становить величину ввібраної радіації, а відношення відбитої до сумарної – в актинометрії називають альбедо (білизна) поверхні[19].

---

[18] *Сонячну активність* пов'язують з нестаціонарністю магнітних полів Сонця, коли періодично виникають на Сонці активні зони – сонячні плями, в межах яких інтенсивність світлового випромінювання значно нижча в порівняно з іншими частинами сонячного диска. На фотографіях Сонця ці місця виглядають темними плямами. При збільшенні плям або їхньої кількості на кілька порядків зростає потік заряджених часточок – "сонячного вітру"(потік альфа- і бета-частинок).

[19] В аерокосмічних методах вживають більш універсальний термін – *яскравість*, в тім числі радіояскравість.

У зимовий час, особливо при малій висоті Сонця і хмарності, помітно зростає вплив рефлексної радіації, відбитої від снігового покриву і повернутої до Землі хмарами. Зазначимо, що сніг і хмари (верхні частини їх також складені зі снігу) мають високе альбедо – 40–90 % (рис. 2.8).

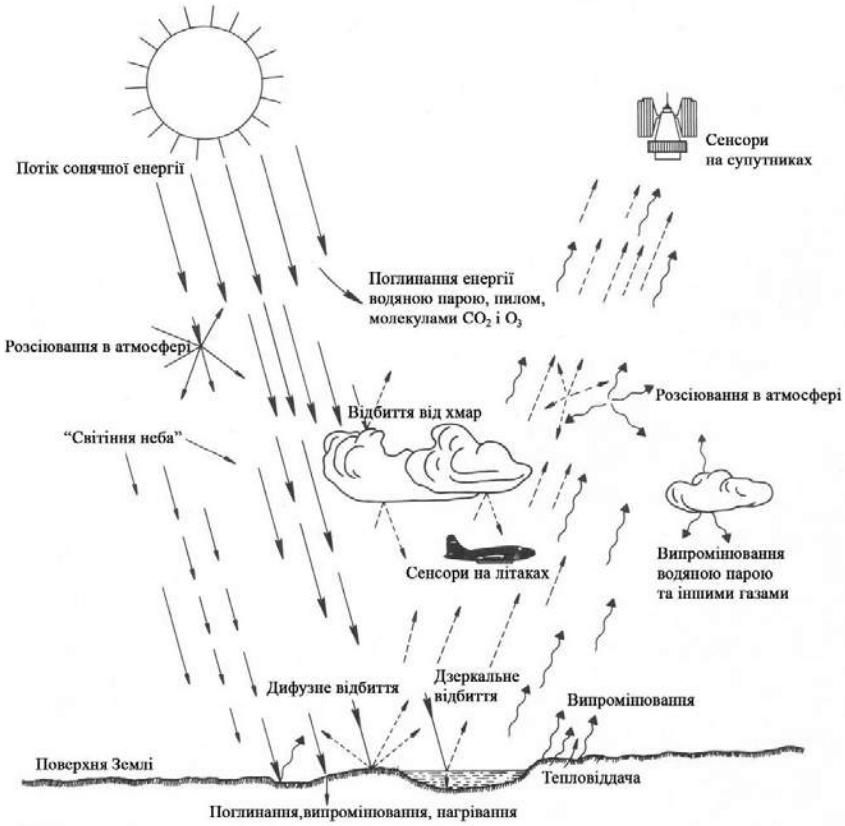



Рис. 2.8. Схема процесів поглинання сонячної енергії в атмосфері і на поверхні Землі [67].

При різних висотах Сонця пік сонячної енергії на земній поверхні припадає на різні довжини хвиль, а саме: при висотах 65°[20]

[20] На широтах, близьких до 48–50° — Франкфурт, Прага, Львів, Київ, Харків – такі (*65°*) *кути висоти Сонця* бувають тільки в обідню пору другої і третьої декади червня та першої декади липня протягом 10–40 хв.

– на хвилі жовто-зеленої та жовтої ділянок спектра (саме такі хвилі є активними в рослинному фотосинтезі). Зменшення висоти Сонця спричинює зміщення піку енергетичного випромінювання до хвиль червоної ділянки спектра оптичних ЕМХ[21]. Варто наголосити, що швидке, навіть різке зниження енергії світлових променів при зменшенні висоти Сонця супроводжується повільнішим зменшенням енергії червоних та інфрачервоних хвиль (рис. 2.9). Саме тому в післяобідній та передвечірній час засмага під променями Сонця може замінитися тепловими опіками.

Інтенсивність випромінювання Сонця в усьому спектрі ЕМХ загалом дуже подібна до ідеального випромінювача – абсолютно чорного тіла. Пряма сонячна освітленість земної поверхні в середніх широтах, зазвичай, дорівнює 100 тис. люкс.

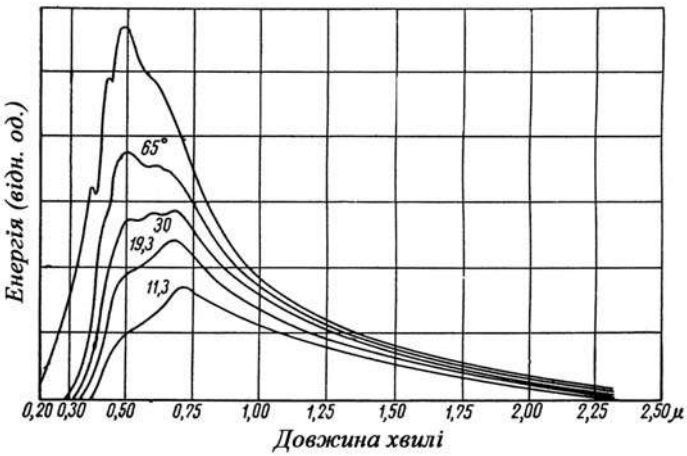



Рис. 2.9. Розподіл енергії в спектрі Сонця за умови ідеальної (сухої і чистої) атмосфери для зазначених висот Сонця 65°; 30°; 19,3° 11,3°, що відповідають масам атмосфери : 1,1; 2; 3;. 4 [55].

Освітленість прямою сонячною радіацією змінюється з прозорістю атмосфери і висотою Сонця (див. рис. 2.9 і 2.11). На рис. 2.9 показано також значне зниження енергії сонячних променів, що доходять до поверхні Землі при збільшенні шляху через атмосфе-

[21] З цим зміщенням пов'язаний також червоний колір диска Сонця в час його заходу.

ру (кількість атмосферних мас), що виникає при зменшенні висоти Сонця. Від кульмінації висоти в передобідній час до висоти 10° над горизонтом кількість сонячної енергії в спектрі максимальної активності при чистій атмосфері зменшується в 5–7 разів.

Під час проходження через атмосферу відбувається загальне ослаблення енергії сонячного випромінювання, і це ослаблення є нерівномірним на різних ділянках ЕМХ (рис. 2.10). В атмосфері є цілий ряд так званих вікон прозорості, в яких певні довжини хвиль проходять майже вільно. Заштриховані частини рисунка відображають зони непроникності, або часткову прозорість для зазначених ЕМХ.

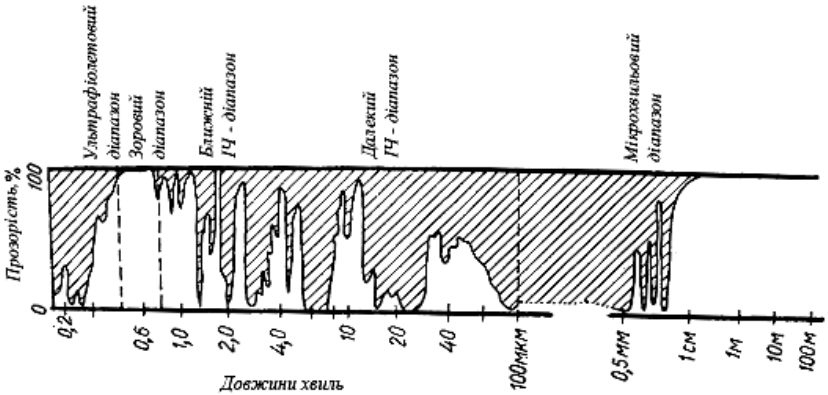



Рис. 2.10. Спектральне пропускання ЕМХ атмосферою [96].

Найактивнішому поглинаючу здатність мають:

- озон стосовно ультрафіолетових хвиль;
- водяна пара – в кількох ділянках червоного та інфрачервоних діапазонів;
- вуглекислий газ – в середньому та ближньому інфрачервоному діапазонах (рис. 2.11).

Така селективність поглинання променів цими складниками повітря проявляється і в інших середовищах (наприклад вода, лід, хмари, рослини).

Селективність поглинання сонячних променів та їхньої енергії особливо виразно проявляються у замутненій атмосфері – з великим вмістом водяної пари та пилових складників (див. рис. 2.11). Біля кожної смуги поглинання зазначено гази, які спричиняють поглинання.

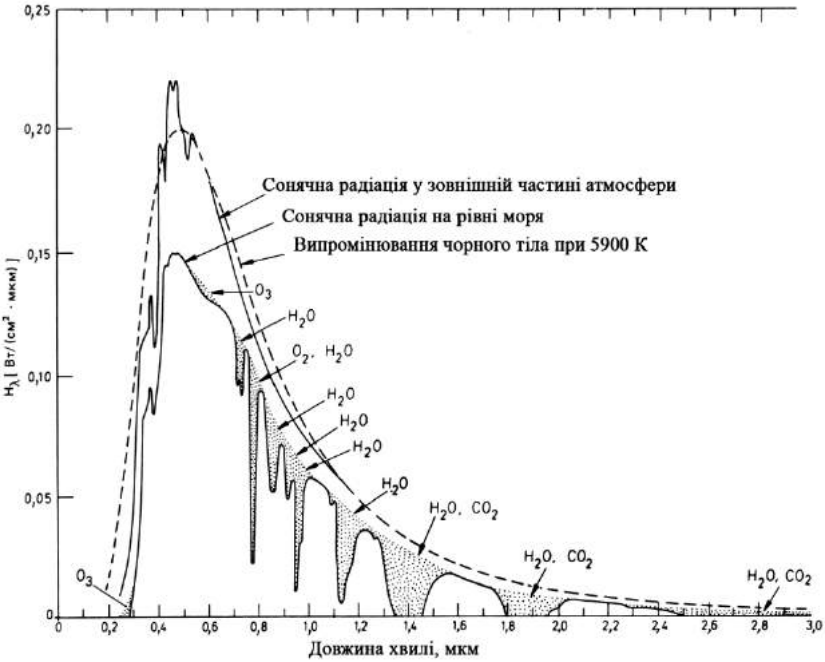
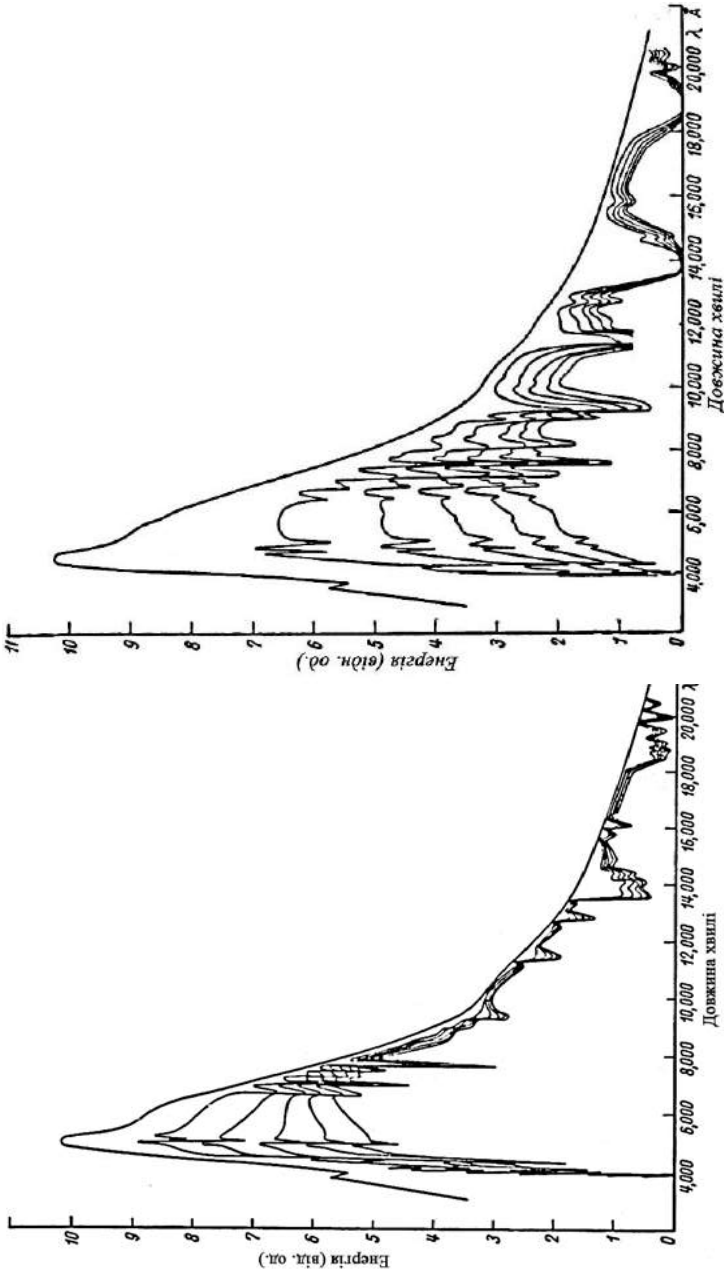



Рис. 2.11. Енергетичний спектр Сонця і смуги поглинання її складниками атмосфери Землі.

Під час порівняння графіків з кривими інтенсивності сонячних енергетичних потоків у чистій і замутненій атмосфері (рис. 2.12 *а, б*) виявимо, що в замутненій атмосфері селективність поглинання енергії виражена набагато сильніше – і для води, і для вуглекислого газу. Додатково зазначимо, що вплив замутненої атмосфери на світлові промені значно сильніший.

Освітленість розсіяною радіацією визначають яскравістю небозводу. Розсіяне випромінювання освітлює всі об'єкти, зокрема ті, що перебувають в тіні власній або падаючій[22]. Вранці і ввечері в освітленні головну роль відіграє розсіяне випромінювання, опівдні – пряме. При висоті Сонця 25° освітленість прямими і розсіяними променями приблизно однакові.

[22] Тінь власна – ослаблена освітленість об'єкта зі сторони, протилежної від джерела світла. Тінь падаюча – затемнена поверхня на шляху променів від джерела світла в місці проекції перешкод (хмар чи наземних об'єктів) під час проходження цих променів.




*а* *б*

Рис. 2.12. Розподіл енергії у спектрі Сонця при різних (рис. 2.9) атмосферних масах:
*а)* в ясний день, *б)* при замутненій атмосфері [56].

Спектральний склад розсіяної і прямої радіації неоднаковий. У сонячному світлі максимум енергії припадає на жовто-зелену частину спектра, а в світлі неба, в розсіяному світлі, цей максимум пересунутий до голубої частини спектра. Причина полягає в тому, що короткі світлові хвилі (сині) розсіюються значно сильніше від довгих. За розрахунками англійського фізика Джона Стретта лорда Релея, інтенсивність розсіяного світла обернено пропорційна четвертому степеню довжини хвилі світла. Отже, фіолетові світлові промені розсіюються в дев'ять разів сильніше, ніж червоні. Саме тому при холодному і чистому повітрі ми бачимо небо в темно-синіх тонах. Розсіювання світла молекулами повітря називають розсіюванням Релея.

У разі збільшення концентрації водяної пари та за наявності в повітрі порівняно великих часток пилу до синього світла, розсіяного сухими молекулами повітря, додається світло, відбите цими пиловими часточками. Вони ж відбивають спектр сонця майже пропорційно падаючому, а тому до синього світла домішуються всі кольори, через що колір неба стає блідо-голубим чи білуватим. Коли ж у повітрі перед заходом сонця наявні дуже дрібні пилинки і крапельки води (туман), то за законом Релея розсіюються здебільшого короткі світлові промені (голубе небо), а диск сонця бачимо червонуватим або червоним. У такі ж кольори зафарбовуються і хмари, а також наземні об'єкти, на які падає світло від "червоного" сонця. Сфотографований освітлений сонячним промінням перед заходом сонця зелений ліс виявиться на кольоровому позитивному знімку виразно жовтим чи помаранчевим.

У розсіяній радіації чистого повітря переважають сині промені спектра. Сумарна кількість світла, яке потрапляє на земну поверхню з розсіяними променями за тривалий час, у регіонах з частою хмарністю в кілька разів більша від освітленості прямими сонячними променями[23]. Проте зазначимо, що інтенсивність інсоляції прямими сонячними променями в конкретний момент у кілька разів перевищує інтенсивність потоку розсіяної радіації.

При ясному небі спектральний склад сумарної освітленості майже стабільний протягом дня, хоч змінюється його інтенсивність. Значні зміни спектрального складу сонячних променів, які

[23] Усі хмарні дні мають багато денного світла, а сонячних днів мало.

пройшли через атмосферу, простежується при висотах Сонця нижчих ніж 15–10°.

Отже, під час проходження сонячних променів через атмосферу відбувається їхня спектральна фільтрація, розсіювання, заломлення, значна трансформація за інтегральною та спектральною інтенсивностями.

### *2.2.2. Сонячне випромінювання і його відбиття наземними об'єктами*

Промені Сонця, потрапляючи на який-небудь об'єкт, взаємодіють з ним: *одна його частка відбивається, інша – поглинається, третя – розсіюється усередині об'єкта, четверта – пропускається*. Баланс потоків оцінюють коефіцієнтами віддзеркалення, поглинання, розсіювання і пропускання, які за законом збереження енергії в сумі завжди становлять одиницю. Для вивчення об'єктів суші дистанційними методами роблять акцент на відбитій радіації, яка визначає їхні оптичні властивості, завдяки відмінностям яких ми відрізняємо об'єкти один від одного і встановлюємо їхні властивості та стани. Знання оптичних властивостей об'єктів необхідне як для розроблення технології отримання знімків, так і для ефективного здобуття зі знімків необхідної інформації.

Оптичні властивості об'єктів непостійні в часі: вони змінні не тільки протягом тривалих відрізків часу, а також впродовж року, сезону, місяця, доби, навіть годин і хвилин. На них впливає низка природних чинників і явищ. Наприклад, оптичні характеристики гірських порід після порохової бурі і дощу суттєво відрізняються одна від одної; вітер і дощ також змінюють (переважно вирівнюють) температурні характеристики наземних об'єктів і впливають на інтенсивність їхнього теплового випромінювання; характер віддзеркалення світла росяною травою абсолютно інший, ніж сухою; листяні ліси по-іншому виглядають у різні пори року; створення і руйнування снігового покриву тощо.

Найважливішими оптичними характеристиками земної поверхні є такі:

- інтегральна та спектральна яскравості;
- контраст яскравості;
- індикатриса відбиття (віддзеркалення);
- коефіцієнт спектральної яскравості (спектральний образ об'єкта).

***Інтегральна яскравість.*** Найважливішою характеристикою оптичних властивостей об'єкта з позицій ДЗЗ є його яскравість. Її визначає сумарна інтенсивність променистого потоку в усьому реальному спектрі ЕМХ, відбитого в певному напрямку, зазвичай, перпендикулярному до відбивальної поверхні. Якщо об'єкт відбиває (або випромінює) променисту енергію дифузно, то його яскравість не залежить від напряму спостереження (закон Ламберта). *Яскравість залежить* від освітленості та від відбивної здатності об'єкта. *Освітленістю* деякої поверхні називаємо відношення світлового потоку певної сили, що падає на визначену поверхню, до величини площі цієї поверхні. Освітленість у кожному пункті екрана (відбиваючої поверхні) є пропорційною *інтенсивності світлової хвилі* в цьому пункті. *Інтенсивність світлової хвилі прямо пропорційна косинусу кута між променем світла і вертикаллю, поставленою в пункті падіння променя, і обернено пропорційна квадрату віддалі до джерела світла.*

*За еталон освітленості* приймають світловий потік від ахроматичної (без кольору), абсолютно білої та ідеально матової поверхні, яка рівномірно відбиваючи світло, є однаково яскравою з різних напрямків спостереження. Її коефіцієнт яскравості дорівнює одиниці.

На відміну від плоскої поверхні еталону поверхня більшості об'єктів, чи природних та антропогенно модифікованих ландшафтів завжди нерівна: розчленована, хвиляста, гребінчаста, гориста з різним рослинним покриттям. Такі поверхні через наявність власних тіней мають меншу яскравість, ніж плоскі. Прикладом цього може слугувати польова ґрунтова дорога : вона завжди (на свіжо ораному чи давно не ораному полі) світліша від прилеглого поля, хоч тип ґрунту і мінеральний його склад ідентичні.

*Ступінь затінення ландшафтних поверхонь* визначають площею тіней, яка росте з кількістю, висотою і шириною елементів нерівностей і зі зменшенням висоти Сонця.

У межах природних зон, фізико-географічних областей і ландшафтних одиниць різних рангів (навіть фацій) простежуються суттєві варіації коефіцієнтів яскравості. Зокрема, коефіцієнт яскравості для літа у лісостеповій зоні коливається в межах 0,11–0,27, а у степовій він ще більший – 0,10–0,34.

Ландшафт та його об'єкти з оптичного погляду (фотометричного) не є однорідними. *Оптичну неоднорідність* ландшафту

або окремих об'єктів даного класу прийнято характеризувати дисперсією коефіцієнтів яскравості, яка, зазвичай, становить 0,02–0,03.

Пояснимо це на прикладі зображення луки. Окремі рослини і їхні частини (стебла, листя, квіти) різні за своїми оптичними характеристиками. Крім того, у складі рослинного покриву луки трапляються угруповання рослин, що відрізняються проективним покриттям, формою і висотою рослин та кількістю відмерлих частин. Все це визначає оптичну неоднорідність, мозаїчність об'єкта, яка посилена різним ступенем розподілу власних і падаючих тіней рослин. Загалом ландшафтний комплекс можна розглядати як випадкове поле яскравостей із законом розподілу, близьким до нормального. Під час спостереження з невеликої висоти над лукою ми зможемо розрізняти окремі рослини і їхні частини, які зі збільшенням відстані спостереження та зменшенням масштабу "перегруповуються" в набір своєрідних плям, що відповідають осередненим оптичним характеристикам окремих рослинних угруповань. У разі подальшого збільшення висоти весь луг сприймається оптично однорідним. Отже, зі зменшенням масштабу і збільшенням висоти спостереження погіршується змога розрізняти дрібні об'єкти за їхньою яскравістю чи кольорами, тобто погіршується просторова роздільна здатність. Цей ефект має також і позитивне значення, бо саме можливості космічних методів знімання вирізняються тим, що "автоматично" вдається отримати генералізоване зображення земної поверхні з добрим вирізненням головних, великих елементів структури земної поверхні та втратою дрібних елементів, що під час вирішення деяких завдань стають перешкодою і мають роль своєрідного світлотонового "шуму".

Отже, під час зміни масштабів дослідження *виникають інтеграція та генералізація об'єктів* і деталей, що насправді можуть дуже відрізнятися за індивідуальною *яскравістю* та тіньовими модифікаціями. Середню яскравість можна визначати за яскравістю всіх об'єктів і деталей.

*Контраст яскравості.* Крім абсолютних величин і коефіцієнтів яскравості, для характеристики оптичних властивостей об'єктів використовують ще кілька похідних показників. Поширеною характеристикою розрізнення двох об'єктів з яскравістю $B_1$ і $B_2$ ($B_1>B_2$) є їхній контраст яскравості, для якого застосовують кілька

виразів. Серед них найбільш вживані відносний (фотографічний) контраст $K_0$ і візуальний (фізіологічний) контраст $K_в$:

$$K_0 = \frac{B_1}{B_2}; \qquad K_в = \frac{B_1 - B_2}{B_1} = 1 - \frac{1}{K_0}.$$

Контраст між найбільш світлими і темними об'єктами визначає діапазон (інтервал) яскравості ландшафту:

$$U = \frac{B_{\max}}{B_{\min}} .$$

Його виражають у логарифмічній формі і називають інтервалом фотографічної яскравості L:

$$L = lg U.$$

Величина інтервалу яскравості залежить від фізико-географічних особливостей об'єктів району та умов його освітлення. Наприклад, найменше значення інтервалу яскравості 1,5 (L = 0,2) мають степові райони з однорідним рослинним покривом, найбільше – 300 (L = 2,5) – високогірні райони зі сніжниками, льодовиками і голими гірськими породами. У середньому значення інтервалу яскравості для літнього ландшафту дорівнює 10 (L = 1,0), а для зимового він збільшується до 30 (L = 1,5).

За однакового освітлення об'єктів та нахилу їхньої поверхні для обчислення величин контрасту та інтервалу яскравості замість величин яскравості використовують коефіцієнти яскравості.

Яскравість об'єктів суші залежить, головно, від їхнього альбедо – "білизни" – відбивної здатності об'єктів. Для прикладу зазначимо ряди загальновідомих поверхонь з різним альбедо: темні чорноземи, світліші від них сірі лісові ґрунти, ще світліші жовтоземи, білі солонці чи виорані карбонатні породи і ще біліші сніги; темні смерекові ліси, світліші дубові, ще світліші березові ліси, зелені трави, сухі жовті трави чи стебла дозрілих зернових культур.

Яскравість водної поверхні залежить від її стану, умов освітлення і напряму спостереження. Через місцевий блиск відбитих сонячних променів на зображенні спокійної водної поверхні, наприклад, озера, ріки, може формуватися сонячна чи місячна "доріжка" суцільного блиску, чи смуга "згущених" відблисків

від елементів розхвильованої водної поверхні, які проходять через усю водну поверхню. Яскравість таких, по суті, однорідних об'єктів може змінюватися від білого до чорного. З цієї ж причини можливі різноманітні об'єднання за яскравістю й неоднорідних об'єктів, наприклад, ділянок водної поверхні і суші.

Яскравість, зумовлена розсіюванням світла в товщі води, залежить від її хімічного складу і концентрації мутності, спричиненої завислими мінеральними частинками, зоопланктоном, нектоном та водоростями. Залежно від довжини хвилі вода послаблює, розсіює або поглинає світло. Вода поглинає промені червоної частини спектра, інтенсивно розсіює сині і частково зелені.

***Індикатриса відбиття*** променів світла. Більшість природних об'єктів по-різному відбивають променистий потік у різних напрямках, тому їхня яскравість в одному напрямі може бути більшою, а в іншому – меншою, ніж в ідеальної плоскої поверхні розсіювання (еталона). Сукупність коефіцієнтів яскравості об'єкта у різних напрямах, зазвичай, зображають графічно у вигляді радіально-полярної діаграми, яку прийнято називати індикатрисою відбиття. Кутова нерівномірність розподілу яскравості залежить від стану і будови поверхні об'єкта; від її рослинного покриву, розчленованості, наявності нерівностей, що створюють тіні.

Розрізняють три основні види індикатрис відбиття та багато їхніх перехідних підвидів. Для об'єктів з гладкою (дзеркальною) поверхнею індикатриса відбиття має максимум, спрямований у протилежний бік від джерела освітлення, головно, в площині падіння променів і під кутом, який дорівнює куту падіння (рис. 2.14, *а*). Поверхні цього типу називають *дзеркальними*. Характерними представниками цієї групи об'єктів є спокійна вод-

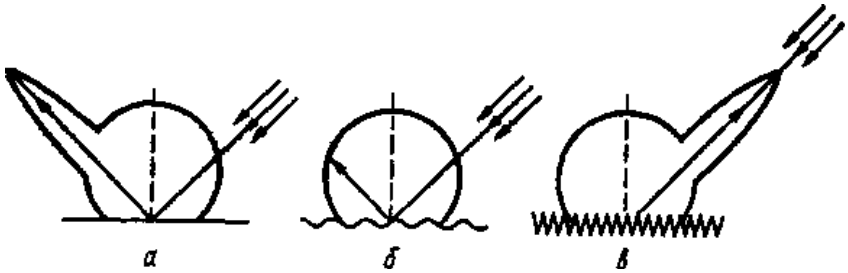



Рис. 2.14. Індикатриса відбиття від гладкої (*а*), матової (б) і розчленованої (*в*) поверхонь [99].

на поверхня, лід, рівний сніг, такири. Зрідка ними можуть бути сухі кам'янисті поверхні (наприклад, нагромадження валунів чи гранітні виступи Прибалтики), накатані ґрунтові дороги, голі скелі. Найбільшу яскравість такі об'єкти мають під час спостереження навпроти сонця.

*Матові* (слабо шорсткі *ортотропні*) поверхні відбивають світло дифузно, тобто рівномірно на всі боки (рис. 2.14, *б*). Таку індикатрису, так звану ламбертівську, повинен мати розсіювач, який приймають за еталон. У природі дифузно відбивають видиме світло сипучі піски, сухі ґрунтові поверхні, суха відмерла рослинність, свіжий рихлий сніг.

Об'єкти з розчленованою поверхнею можуть мати індикатрису відбиття, витягнуту в напрямі до джерела світла, тобто протилежну дзеркальній поверхні (рис. 2.14, *в*). Ці поверхні називають *антидзеркальними* та *орієнтованими*. Так відбивають світло великі скиби зораного поля, рослинний покрив з певною орієнтацією листових поверхонь, схили гір, шатрові дахи будинків. Максимальна яскравість цих об'єктів простежується з боку падаючих променів. Асиметрія їхніх індикатрис залежить від нахилу та орієнтації поверхонь стосовно падаючих променів світла.

У природі більшість поверхонь не мають виразної належності до зазначених індикатрис, а лише володіють певною специфікою відбиття, що дає змогу кваліфікувати їх за належністю до якогось з виокремлених типів. Прикладами поверхонь, які мають неоднакові відбивні властивості в різних напрямах (індикатриси змішаного типу) є ґрунти пустель (рис. 2.15), яким властиві індикатриси, близькі до ортотропних, але матові однорідні піщані ґрунти майже рівномірно в усі боки розсіюють променистий потік, гладкі такири найбільше віддзеркалюють світло, а шорсткуваті солончаки максимально відбивають навпроти джерела світла (майже антидзеркальна індикатриса). Такі поверхні називають "комбінованими", чи "змішаними" за специфікою відбиття світла.

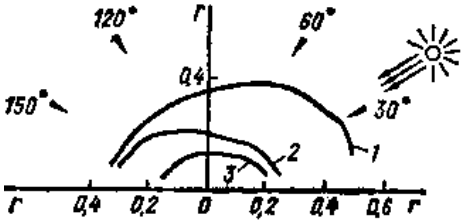



Рис. 2.15. Індикатриса відбиття ґрунтів у зоні пустель:
*1* – солончак, *2* – такир,
*3* – піщаний ґрунт [99].

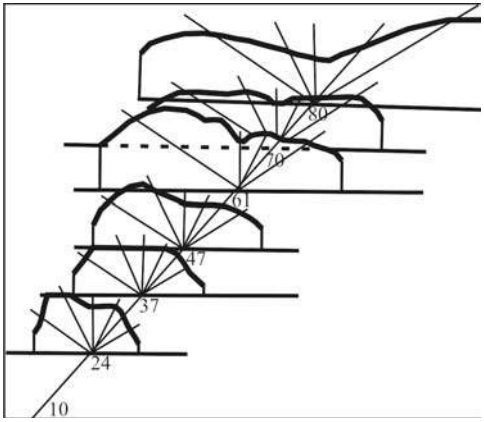



Рис. 2.16. Індикатриси відбиття ячменю, що перебуває в стадії колосіння при різних зенітних кутах Сонця [81].

Індикатриси багатьох поверхонь можуть суттєво змінюватися під час зміни висоти сонця і напряму падіння його променів (рис. 2.16). Крім того, вплив на вигляд індикатриси має також тимчасова зміна кута нахилу рослинних елементів, спричинених вітром, зволоження поверхонь дощем, росою та інші тимчасові чинники. Однак при всіх тимчасових змінах форма індикатрис залишається порівняно стабільною і має суттєве значення під час вибору параметрів та позицій знімання, які потрібно враховувати під час дешифрування зображень.

***Спектральна яскравість***

*Властивості об’єктів у світлових потоках*

На земній поверхні значно поширені забарвлені об’єкти. Світло, яке викликає в наших очах відчуття того чи іншого кольору, має досить складний спектральний склад. Досліди довели, що наші очі є досить недосконалим апаратом для аналізу спектрального складу світла, бо різні композиції світлових потоків можуть викликати цілком однакові відчуття кольору. Тим не менше саме за допомогою очей ми отримуємо знання про величезну багатобарвність об’єктів навколишнього світу.

Світло, яке потрапляє в наше око, здебільшого йде не від джерела світла, а попередньо проходить через тіла, частково в них поглинаючись, більше чи менше відбиваючись від їхніх поверхонь. Кольори різних предметів, освітлених одним джерелом світла, бувають дуже різними. Це залежить від співвідношення коефіцієнтів відбиття, пропускання та поглинання світла, властивих цим об’єктам. Найважливішими є перші два із зазначених коефіцієнтів. Кожен з коефіцієнтів залежить також від довжини хвиль (кольору) у конкретному діапазоні світла. Зокрема, в об’єктах, яким

властивий для "червоних хвиль" великий коефіцієнт пропускання і малий відбивання, а для "зелених хвиль", навпаки, простежуються два кольори: червоний колір "на просвіті" і зелений – у відбитому світлі. Саме такими властивостями володіють зерна хлорофілу (спиртова витяжка із зернами хлорофілу). Тіла, які мають коефіцієнт вбирання світла великий, а відбиття – малий будуть виглядати темними (наприклад, темнохвойні ліси або вода в зелених, жовтих, червоних та інфрачервоних хвилях).

Значить, спектральний склад світла, що доходить до нашого ока, може виявитися значно зміненим завдяки специфіці відбиття, селективному поглинанню чи розсіянню, властивим цим об'єктам. Значна кількість об'єктів ослабляє потік світла інтегрально та спектрально, тобто ослаблення відбувається в тих чи інших ділянках світлового спектра, не додаючи своїх світлових хвиль. (Винятком може бути хіба люмінесценція[24] чи фосфоресценція[25]).

Отже, світло, яке йде від об'єктів, несе інформацію про них, їхній склад, фізичні чи хімічні властивості. Потрібно лише вміти (мати змогу) виміряти світловий потік від об'єкта інтегрально та в кожній ділянці спектру зокрема, зіставити одержаний результат зі спектром падаючого світла і знати, який ефект в корекції відбитого (профільтрованого) світла може викликати та чи інша властивість об'єкта. Це не проста, а надскладна задача, яку вирішують вже десятки років. Досягнуті значні успіхи, проте ще залишається велике поле діяльності для покращення результатів. Особливо важливими є вони для виконання точного комп'ютерного дешифрування матеріалів знімання, навіть на невідомій для дешифрувальника території.

Яскравість наземних (і не тільки) об'єктів у різних спектральних зонах неоднакова і характеризується коефіцієнтами спектральної яскравості $r_\lambda$. Значення цих коефіцієнтів, подане графічно, формує "криву спектральної відбивної здатності", яку називають *"спектральним образом об'єкта"*. Велика різноманітність наземних об'єктів створює таку ж різноманітність їхніх спектральних

---

[24] Люмінесценція – свічення речовин, що виникає під впливом опромінення світлом чи іонізуючими променями, проходженням струму (люмінесцентні лампи).

[25] Флуоресценція (флюоресценція) – короткочасне світіння деяких речовин після їхнього освітлювання (мінерал флюорит); фосфоресценція – один з видів флуоресценції.

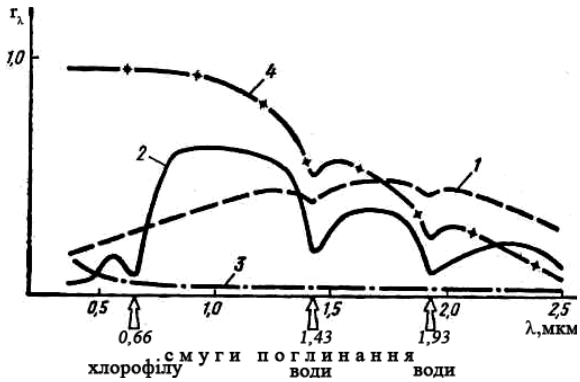



Рис. 2.17. Схематичні криві спектральної відбивної здатності гірських порід і ґрунтів (*1*), рослинного покриву (*2*), водних поверхонь (*3*) і снігу (*4*).

образів. При цьому об'єкти подібного характеру мають подібні спектральні образи, а тому їх можна типізувати і вивчати відмінності та причини їхнього виникнення (рис. 2.17).

Спектральний образ у межах певного типу об'єктів є характеристикою досить стійкою у разі збереження всіх умов вимірювання, освітлення і стану самого об'єкта. Зі зміною цих вихідних умов показники спектральної яскравості в певних межах змінюються, подібно як змінювалася вище описана інтегральна яскравість об'єктів. Передусім це стосується освітлення: денний спектр кольорів сонця відрізняється від передвечірнього, що важливо для кольорової оцінки об'єктів; кут падіння сонячних променів також постійно змінюється, що впливає на його співвідношення з кутами орієнтації та нахилу об'єкта стосовно сторін горизонту. Крім того, на стан об'єктів постійно впливають атмосферні опади, вологість ґрунту, запиленість, фенофази розвитку рослин, затінення, проективне покриття, навіть вітер. Отже, спектральні образи об'єктів можуть суттєво змінюватися в часі. Наголосимо, що зазначене стосується змін яскравості в кожній з ділянок світлового спектра.

У межах поля огляду знімальної апаратури контактують чи "сусідять" об'єкти з різними спектральними образами, що впливає також на характер "збірного" спектрального образу біогеоценозу, фації, чи їх просторових поєднань, а тому постає необхідність вивчення спектральних образів природних територіальних одиниць різних рангів.

Отже, оптичні поля земної поверхні можуть бути описані спектральним коефіцієнтом яскравості й індикатрисою відбиття,

які характеризують структуру відбитого об'єктами випромінювання для різних довжин хвиль, різних напрямів спостереження та освітлення.

На спектральній відбивній здатності об'єктів засновані різні способи і засоби отримання та опрацювання аерокосмічної інформації, у тім числі й автоматичне розпізнавання однотипних об'єктів. Для цього необхідно мати у своєму розпорядженні фонд даних про спектрально-енергетичні характеристики природних і антропогенних утворень у всьому їхньому динамічному різноманітті. Тому визначення коефіцієнтів спектральної яскравості та індикатрис віддзеркалення різних компонентів ландшафту і цілих природно-територіальних комплексів різних таксономічних рангів є однією з актуальних проблем аерокосмічних методів.

Головний метод вивчення спектральної відбивної здатності об'єкта – експериментальний. Способи визначення коефіцієнтів яскравості засновані на порівнянні виміряних за допомогою вимірювального спектрального приладу (спектрометра) двох відбитих променистих потоків – від досліджуваного об'єкта і від еталона.

Найкраще вивчена спектральна відбивна здатність таких об'єктів: геологічних, рослинних, ґрунтових і гідрологічних. Найбільший об'єм даних отриманий для довжин хвиль від 0,4 до 0,8 мкм, менше – до 1,0–1,2 мкм і ще менше до 2–3 мкм. Фундаментальною роботою в цій галузі є монографія Е.Л. Крінова, в якій залежно від відбивної здатності все різноманіття об'єктів ландшафту розділене на три класи: гірські породи і ґрунти, рослинний покрив, водні і снігові поверхні, кожен з яких відрізняється своєрідною кривою відбивної здатності (див. рис. 2.17).

*Клас I – гірські породи і ґрунти*. Спектральні коефіцієнти яскравості об'єктів цього класу мають тенденцію зростати у міру просування в довгохвильову частину спектра до хвиль довжиною 1,5 мкм і знижуватись до хвиль 3 мкм. Деякі криві спектральної відбивної здатності цього класу проходять через максимум в різних ділянках спектра. Зокрема, яскравість ґрунтів різних типів монотонно зростає до довгохвильової частини спектра, досягаючи найбільших відмінностей в оранжево-червоній зоні (рис. 2.18).

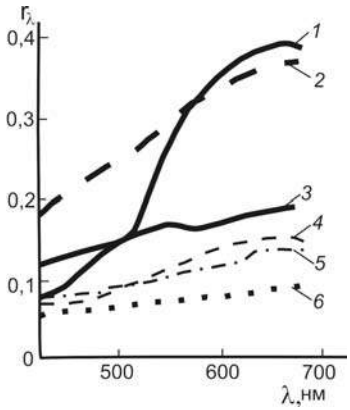
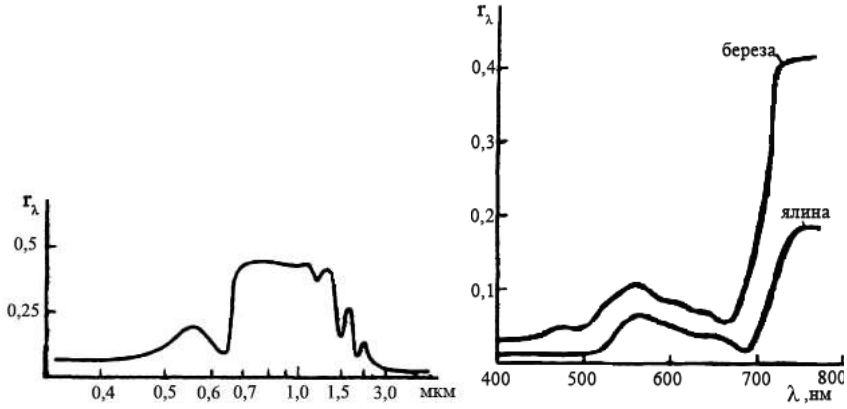



Рис. 2.18. Коефіцієнти спектральної яскравості основних типів ґрунтів: *1* – червонозем, *2* – сірозем, *3* – дерново-підзолисті, *4* – темно-каштанові, *5*– лісові темно-сірі, *6* – чорнозем.

Для зонального ґрунтового покриву характерні незначні варіації спектральних коефіцієнтів яскравості. Спектральні властивості ґрунту залежить від ґрунтових “пігментів” – гумусу й окису заліза. Гумус, наприклад, знижує коефіцієнти яскравості ґрунту у всій видимій області (див. рис. 2.18).

Підвищення вологості ґрунтів призводить до зниження значень коефіцієнтів яскравості при незмінному характері кривої спектральної відбивної здатності. Виразне зменшення яскравості у піщаних ґрунтах відбувається при зміні вологості на 2%, а у глинистих – на 20%. У разі зволоження різних ґрунтів до повної польової вологоємності їхній коефіцієнт яскравості зменшується в 2 рази порівняно з повітряно-сухим станом. Зволоження засолених ґрунтів призводить до швидшого зменшення їхньої яскравості порівняно з вилуженими. У посушливий період розчинні солі виступають на поверхні ґрунту, що різко підвищує їхню яскравість. Все це дає змогу отримати за аерофото- і космічними знімками достатньо якісну інформацію про вологість ґрунтів, яка залежить від розподілу і кількості опадів.

*Клас II – рослинний покрив.* У рослинному покриві, що займає 56% площі суші, потрібно розрізняти відбивну здатність фітоценозів, окремих рослин і їхніх частин. Крива відбивної здатності рослинності, яка вегетує, завдяки ряду виразних мінімумів і максимумів має специфічну форму (рис. 2.19). У зоровій області наявні два мінімуми – в синьо-фіолетовій (400–470 нм), червоній (680–690 нм) і один мінімум в зеленій (540–580 нм) зонах спектра, що пояснюють поглинанням і віддзеркаленням цих променів хлорофілом, який міститься в зеленому листі і хвої. За межами видимої зони віддзеркалення променистої енергії зеленими рослинами значно збільшується – в ближній інфрачервоній зоні, починаючи з довжин хвиль




*а* *б*

Рис. 2.19. Спектральна відбивна здатність рослинності:
*а* – під час вегетації, *б* – збільшений фрагмент графіка спектральної відбивної здатності деревної рослинності [51].

700 нм, коефіцієнти віддзеркалення зростають у 3–5 разів. Мінімуми в інфрачервоному діапазоні пов'язані з поглинанням водою, що міститься в рослинах. У період вегетації форми кривих відбивної здатності вищих рослин дуже схожі, що зумовлене оптичними властивостями хлорофілу.

Закономірності сезонної зміни відбивної здатності великих районів виявляються з орбітальних висот. Зокрема, були встановлені глобальні явища проходження весняної "зеленої хвилі", пов'язаної з розвитком листяного покриву, яка розповсюджується з півдня на північ (у північній півкулі) приблизно зі швидкістю 20 км/добу, і проходження "коричневої хвилі" – опадання листя восени.

Відбивна здатність змінюється також з віком рослин: вона вища у молодих рослин і нижча у тих, що перебувають у стадії повної зрілості. Наприкінці періоду вегетації у рослин простежується суттєве зниження інфрачервоного віддзеркалення.

Оптичні властивості рослин залежать від їхнього географічного положення та екологічних умов. За хороших умов місцезростань рослини мають менші коефіцієнти віддзеркалення і чіткіший максимум у зеленій зоні спектра, ніж рослини, що виростають в поганих екологічних умовах. Наприклад, завжди затінені рослини, що містять мало хлорофілу в листі, відбивають більше світла, ніж

нормально освітлювані рослини. У разі захворювання рослин їхнє листя відразу ж починає зменшувати віддзеркалення в ближньому інфрачервоному піддіапазоні.

Підвищення температури рослин і ґрунтів позначається на їхній яскравості: в інфрачервоній зоні вона зростає в денний час і в безхмарну погоду. У посушливу погоду яскравість рослинного покриву вища, ніж в сиру.

Трансформація кривої віддзеркалення – підвищення коефіцієнтів у видимій області і зниження в інфрачервоній – простежується у рослин, які виростають в районах рудних родовищ (олова, свинцю, міді, цинку), ґрунт яких містить мікроелементи в кількостях, що відрізняються від норми. На знімках таким чином рослини виступають індикаторами родовищ деяких корисних копалин, а також районів забруднення навколо таких родовищ.

Яскравість рослинних угруповань суттєво залежить від висоти і ступеня зімкнутості рослин, яка визначає співвідношення освітлених і затінених частин. За однакової зімкнутості яскравість рослинних поєднань тим вища, чим меншою є висота рослин. Тому, наприклад, листяні ліси мають менші коефіцієнти яскравості, ніж лучна рослинність, хоч яскравості листя дерев і трав'янистих рослин однакові.

*Клас III – водні поверхні.* Унаслідок сильного поглинання водні поверхні мають яскравість у 5–10 разів меншу, ніж суша, сніговий покрив і хмари. З цієї ж причини на знімках, отриманих у ближньому інфрачервоному піддіапазоні, водні поверхні виразно пізнають на тлі навколишньої суші за їхньою темнотою, чорнотою. Водні об'єкти вирізняються чіткою окресленістю, оптичною однорідністю – просторові варіації коефіцієнтів яскравості незначні. Криві спектральної відбивної здатності водоймищ змінюються залежно від їхньої глибини, концентрації суспензій і тощо; іноді вони з невеликим максимумом у зоні 0,55 мкм, що зумовлене наявністю рослинності у воді.

*Клас IV – сніговий покрив і хмари*. Для об'єктів цього класу характерна висока яскравість у зоровій частині хвиль і зменшення спектральних коефіцієнтів яскравості від короткохвильової до довгохвильової частини спектра. Сніг і хмари – найяскравіші об'єкти ландшафту. Найчастіше їхні коефіцієнти яскравості становлять 0,6–0,9. Характер відбивної здатності засніжених поверхонь і хмар-

ності подібний. Наголосимо, що коефіцієнти спектральної яскравості сухого і вологого снігу в червоній і ближній інфрачервоній зоні спектра виразно різні.

Спектрометрична класифікація природних об'єктів, яку запропонував Е.Л. Крінов, є результатом експериментальних визначень спектральних коефіцієнтів яскравості у зоровому діапазоні електромагнітних хвиль. Логічно припустити, що ця класифікація є правильною і для частини інфрачервоного діапазону, де у випромінюванні земних об'єктів переважає відбита сонячна радіація.

Додаткові деталі спектральних образів об'єктів та специфіки формування зображень виділених класів об'єктів подано у відповідних розділах підручника.

### *2.2.3. Власне випромінювання Землі*

З позицій енергетичного обміну наша планета Земля загалом поводиться подібно до "абсолютно чорного тіла". Вона поглинає сонячну енергію і сама випромінює з інтенсивністю, що відповідає її температурі. На рис. 2.20 подано зображення кривих випромінювання природних тіл з різними температурами – від Сонця до зрідженого повітря.

Оскільки всі тіла, що є об'єктами ДЗЗ мають порівняно низьку температуру, то максимуми спектрального розподілу їхнього випромінювання реєструються в довгохвильовій зоні спектра. Відповідно до температури Землі *максимум енергії земного випромінювання припадає на інфрачервоні промені* з довжиною хвилі близько 10 мкм. В аномально нагрітих тіл максимум випромінювання зміщений на довжини хвиль 5–7 мкм. Земне інфрачервоне випромінювання при довжині хвилі 3–4 мкм має максимальну інтен-

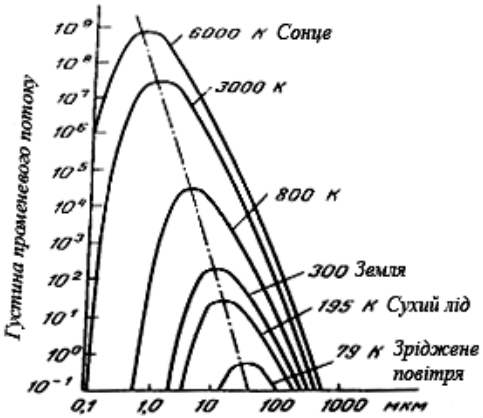



Рис. 2.20. Залежність густини потоку ЕМХ, яке випромінює абсолютно чорне тіло, від температури та його аналоги з природними об'єктами [81].

сивність. У бік довгих хвиль воно *поширене на радіодіапазон* і його реєструють навіть на метрових радіохвилях. Основна енергія випромінювання Землі припадає на хвилі завдовжки 3–30 мкм.

Інтенсивність теплового випромінювання об'єктів визначають за їхньою випромінювальною здатністю і температурою. Як вже було наголошено, найбільшою випромінювальною здатністю, яку приймають за одиницю, володіє абсолютно чорне тіло. У решти об'єктів коефіцієнт випромінювальної здатності менший – 0,8–0,9, а в деяких гірських порід – 0,6–0,7.

Випромінювальна здатність різних реальних об'єктів, як і відбивна, має певний спектральний хід. Всі об'єкти за їхньою випромінювальною здатністю можна класифікувати як об'єкти з "сірим" (нечорним) та селективним випромінюванням. У "сірих" об'єктів крива залежності інтенсивності випромінювання від довжини хвилі подібна до кривої абсолютно чорного тіла. У селективних випромінювачів крива розподілу інтенсивності випромінювання залежна від вибіркової поглинаючої та випромінюючої здатності кожного специфічного тіла.

Своєрідний характер залежності випромінювальної здатності від довжини хвилі у різних об'єктів дає змогу їхньої ідентифікації за величиною інтенсивності випромінювання в різних спектральних діапазонах. Зокрема, кислі гірські породи відрізняються від лужних за характером кривої спектральної випромінювальної здатності.

Пряма залежність інтенсивності інфрачервоного випромінювання об'єктів від їхньої поверхневої температури лежить в основі дистанційних методів її визначення, яке можна виконувати з порівняно високою точністю. Наприклад, у літній день підвищення температури на 10° збільшує енергію випромінювання на 10–15%, що забезпечує вимірювання абсолютних температур об'єктів з помилкою в кілька часток градуса.

Температура об'єктів на земній поверхні, здебільшого, залежить від їхньої теплової інерції (здатності чинити "опір" нагріванню або охолоджуванню), від альбедо, випромінювальної здатності, геотермального потоку, експозиції і крутизни схилу. На швидкозмінне температурне поле чинять вплив вітер, хмарність, атмосферні опади.

За температурним режимом об'єкти на земній поверхні ділять на об'єкти з власною аномальною температурою (вулка-

ни, термальні води, промислові споруди тощо) та об'єкти, які нагріває Сонце. Температура об'єктів другої групи росте з висотою Сонця, досягаючи максимуму опівдні, потім зменшується до вечора, падаючи до свого мінімуму у ранкові часи перед сходом сонця (рис. 2.21).

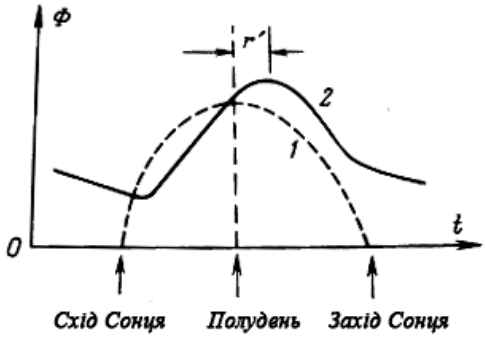



Рис. 2.21. Денна динаміка потоку радіації в тепловому діапазоні, відбитої Землею: розрахункова (1) і виміряна (2) [81].

За зареєстрованим тепловим потоком, який йде від об'єкта, визначають так звану *радіаційну температуру*, яка у зв'язку з різницею випромінювальної здатності різних об'єктів може суттєво відрізнятися від фізичної температури. У випадку реєстрації не абсолютних температур, а тільки температурних (радіаційних) контрастів, тобто у випадку отримання інформації типу "тепліше, ніж…" або "холодніше, ніж…" також можливе ефективне виділення об'єктів і характеристика їхніх властивостей за температурними аномаліями. Для прикладу, за температурними контрастами виділяють тварин на фоні природного середовища, вулкани, гідротермальні об'єкти, зони окислення сульфовмісних родовищ, зволожені ділянки розривних структур, поховані долини, різнотемпературні потоки у водному середовищі тощо.

Нагріті об'єкти як було зазначено, випромінюють енергію не тільки в інфрачервоному, а й в радіодіапазоні, хоч радіотеплове випромінювання за інтенсивністю у мільйони разів слабше, ніж інфрачервоне. Воно залежить від електричних і теплофізичних властивостей об'єкта, температури і шорсткості його поверхні. Інтенсивність радіотеплового випромінювання провідників дуже мала, а ізоляторів (діелектриків), до яких належить велика кількість природних об'єктів, значна. Зі зростанням діелектричної проникності[26] об'єктів інтенсивність їхнього випромінювання зменшується.

[26] Діелектриками називають речовини, які не проводять електричний струм. Діелектрична проникність ґрунтів залежна від їхньої вологості, зокрема, від вологонасиченості.

Потужність випромінювання ідеального випромінювача – абсолютного чорного тіла – при певній довжині хвиль пропорційна його температурі, а потужність випромінювання реальних об'єктів залежить ще й від випромінювальної здатності. Інтенсивність радіотеплового випромінювання для зручності характеризують однією величиною $T_g$ – добутком абсолютної температури $T_0$ на коефіцієнт випромінювання *к (капа)*:

$$T_g = \kappa T_0.$$

Цей добуток називають *температурою радіояскравості* (або *яскравістю*). Температура радіояскравості реального об'єкта дорівнює температурі абсолютно чорного тіла, що створює випромінювання такої ж потужності, як і даний об'єкт.

Величина коефіцієнта випромінювання значно варіює. Вона залежить від електричних властивостей об'єкта, характеру його поверхні, довжини хвилі і кута спостереження. Найбільше його значення мають рослинні покриви (0,9), дещо менше – ґрунти (0,8), ще менше – водні поверхні (0,4) і, металеві предмети.

Отже, *варіації радіояскравості* визначені, головно, випромінювальною здатністю об'єкта, а не його температурою, яка для об'єктів зазвичай, укладається в діапазоні 250–300 К[27]. Найменшу радіояскравість (після атмосфери) можуть мати водні поверхні (100 К), найбільшу – рослинні покриви (300 К). Варіації температури радіояскравості об'єктів у разі зміни їхнього стану протягом доби, сезонів, років становлять одиниці і перші десятки градусів. Це дає змогу, зокрема, за варіаціями яскравості земної поверхні в сантиметровому діапазоні реєструвати добові коливання її температури, а у дециметровому – сезонні.

Розглянемо деякі аспекти випромінювальної здатності об'єктів у *радіодіапазоні*. Інтенсивність радіотеплового випромінювання водної поверхні залежить від кута спостереження і виду поляризації. На температуру радіояскравості водної поверхні чинить суттєвий вплив її хвилювання. Хвилі на водній поверхні збільшують її яскравісну температуру, оскільки пінні гребені мають вищий коефіцієнт випромінювання (0,8), ніж вода. Площа водної

[27] Кельвіна градус – 1/273,16 частина термодинамічної температури потрійної точки води. Приблизно нуль градусів Цельсія дорівнює 273 градусам Кельвіна.

поверхні, покритої піною, зростає пропорційно швидкості вітру. Отже, є певна кореляція між швидкістю вітру і радіояскравісною температурою водної поверхні.

Випромінювальна здатність нафти вища, ніж морської води. Це дає змогу дистанційно реєструвати нафтову плівку на поверхні морів (в умовах штилю).

Температура радіояскравості льоду, зазвичай, на декілька десятків градусів вища, ніж води. Це пояснюють вищим коефіцієнтом випромінювання льоду, причому випромінювальна здатність прісноводих льодів вища, ніж морських. Відмінність у випромінювальній здатності води і льоду визначає сезонний хід радіояскравісної температури полярного басейну.

На мікрохвильове випромінювання поверхні, покритої сніговим покривом, помітно впливає вологість снігу. Величина радіовипромінювання сухого холодного мерзлого, кристалічного пухкого снігу не залежить від його потужності, але при підвищенні його температури до 0°С простежується виразний зв'язок між температурою радіояскравості і потужністю снігу.

Радіаційні характеристики ґрунтового покриву в НВЧ-діапазоні, крім температури, залежать від механічного складу, пористості, розчленованості поверхні, але найбільший вплив чинить вологість. Перепад рівнів радіовипромінювання сухого ґрунту і в стані повної вологоємкості становить 50–100°К. Величина перепаду і чутливість сучасних приладів забезпечують дистанційне визначення до 10 градацій вологості.

Характерно, що поверхневі горизонти випромінюють у короткохвильовому діапазоні, глибші – у довгохвильовому. Тому випромінювання різних довжин хвиль несе інформацію про вологість ґрунту на різних глибинах. Значення радіояскравості добре корелює з величиною вологовмісту в шарі завтовшки 0,1–1,0 довжини хвилі. Радіотеплове випромінювання дає змогу визначити вологість поверхневого шару ґрунту потужністю 10–20 см.

Рослинний покрив володіє найбільш високими випромінювальними властивостями, які наближені до ідеального випромінювача – абсолютно чорного тіла. Температура радіояскравості зростає пропорційно висоті і густині рослин. Радіотеплове випромінювання різних ґрунтово-рослинних зон (лісова зона, степ, пустеля) помітно різне. Воно має виражений річний хід з

максимумом у літній період. Найбільші просторові радіотеплові контрасти простежуються взимку (через сніговий покрив) та у весняно-осінній період (через вологість випромінюючого шару ґрунту).

### *2.2.4. Штучне (радіо) випромінювання*

У попередніх розділах було описано природне сонячне випромінювання, його зворотний потік, відбитий поверхнею Землі, та власне випромінювання радіаційно-активного шару (діяльного шару) поверхні Землі. Різноманітні методи фіксації цих потоків променів становлять групу методів "*пасивного* знімання". У цьому підрозділі йтиметься про випромінювання "штучне", тобто про радіовипромінювання, вироблене спеціальними пристроями – генераторами радіохвиль. Таким пристроєм є кожен радіопередавач (у довгих, середніх, коротких чи надкоротких хвилях), однак для ефективного дистанційного знімання можуть бути застосовані радіохвилі тільки певних довжин і частот. Методи, які ґрунтуються на використанні штучно генерованого випромінювання ЕМХ називаємо "*активними* методами ДЗЗ".

Найбільше значення для дистанційного знімання має радіовипромінювання НВЧ[28]-діапазону, який володіє великою проникаючою здатністю і тому безперешкодно досягає земної поверхні незалежно від метеорологічних умов.

Основними знімальними приладами, в яких застосовують штучне випромінювання, є радіолокатори[29] (радари). Своє перше застосування радіолокатори набули у військовій справі (під час виявлення та визначення місцезнаходження кораблів, літаків, віддалей до них), а пізніше і в цивільній навігації, виявлення айсбергів, скель у тумані, градових хмар, а в автомобілях – для реагування на появу перешкод чи зайвих об'єктів на трасі руху. Після пристосування радіолокаторів до формування зображень земної поверхні їх почали застосовувати для "льодової розвідки" з літаків, а вже згодом і до ДЗЗ з космосу. Для тематичної інтерпретації радіолокаційних знімків (Рл-знімків) важливою є інформація про формування "радіовідлуння" від об'єктів земної поверхні: вияв-

[28] НВЧ – надвисокочастотний діапазон ЕМХ.
[29] Див. розділ "Знімальна апаратура".

ляється, що на характер відбиття штучного радіосигналу впливає і структура поверхні, і речовинний склад природних об'єктів (в тім числі рослин, ґрунтів, гірничих порід та води).

Під дією радіохвиль, які прийшли до поверхні Землі, в ґрунті та у водному середовищі виникають струми високої частоти (найсильніші біля випромінювальних антен). Частина енергії радіохвиль витрачається на підтримування цих струмів, що виділяють у воді чи ґрунті певну кількість тепла. Ці втрати енергії, а також ослаблення хвиль залежать від електропровідності середовища та від довжин хвиль. Короткі хвилі затухають швидше, ніж довші. У разі доброї провідності (морська вода) високочастотні струми проникають на меншу глибину від поверхні, ніж при поганій (сухий ґрунт). Відповідно, в першому випадку втрати енергії у воді є меншими. Саме тому радіопередавачі на морі покривають значно (в кілька разів) більші відстані, ніж на суші.

Найважливішими характеристиками віддзеркалення[30] (перевипромінювання) радіохвиль, як і світлових, є коефіцієнт відбиття та індикатриса відбиття, які в радіофізиці прийнято називати коефіцієнтом зворотного розсіяння та діаграмою зворотного розсіяння. Коефіцієнт зворотного розсіяння залежить від електрофізичних параметрів об'єкта, а діаграма – від геометричних властивостей об'єкта (розмірів, форми, орієнтації стосовно падаючих променів, кута нахилу стосовно горизонтальної поверхні, чи вертикалі в пункті падіння променів).

Радіосигнал, точніше радіовідлуння, що приходить, повертається до радіолокатора від поверхні, яка відбила посланий радіолокатором імпульс. Радіопромінь складається, зазвичай, з променів зворотного розсіяння багатьох "центрів[31]" – пунктів відбиття, кожен з яких характеризується своїм коефіцієнтом відбиття. Загалом відбитий радіосигнал є інтегрованою сумою відбиття всіх елементів (центрів) опроміненої поверхні. Співвідношення між енергією відбитого і посланого радіосигналу становить суть коефіцієнта відбиття. Досліджено, що характеристики зворотного

---

[30] Терміни "віддзеркалення", "відбиття", "зворотне розсіяння", "відлуння і радіо відлуння" вживаємо і як синоніми.

[31] Центр відбиття (пункт відбиття) – елементарна поверхня, від якої відбивається радіопромінь: мікроплощадка, грудочки землі, стовбур дерева та елементи його кори, гілки, листочки.

розсіяння одних і тих самих природних об'єктів досить мінливі. Зокрема, якщо одне зоране поле в різних своїх місцях має різні висоту скиб, грудкуватість чи брилуватість, зволоженість тощо, то ж мусить мати різні характеристики відбиття радіохвиль, співвідношення відбиття і проникнення.

*Характер взаємодії зондувального електромагнітного випромінювання із земною поверхнею залежить від* ***довжини*** *хвилі, її* ***поляризації*** *та* ***кута*** *падіння* (*"візіювання"*). Цей факт інтерпретатор повинен враховувати під час тематичного аналізу Р*л*-знімків. Практика використання Р*л*-знімання показала також, що для кожного з можливих тематичних застосувань параметри Р*л*-знімання повинні бути пристосовані до конкретної теми застосування, а тому в плануванні знімання потрібно враховувати вимоги тематичного завдання.

Найбільш вживаними довжинами хвиль для радіолокаційних систем є ультракороткі хвилі від 0,8 до 30 см. Для дистанційного зондування призначають радіолокаційні системи, які працюють у так званих Ка-, Х-, та L – діапазонах[32], що відповідають таким інтервалам ЕМХ: Ка – діапазон: 0,8–1,1см, Х – діапазон: 2,4–3,8 см, L – діапазон – 15–30см.

*Довжина ультракоротких хвиль визначає* їхню проникну здатність: зі збільшенням довжини цих хвиль зростає їхня здатність проникати в речовину чи проходити крізь неї. Крім того, здатність радіолокаційного випромінювання проникати в ґрунт, гірські породи, рослинність чи воду залежить також від низки інших параметрів передусім від кута візіювання структури поверхні та діелектричних властивостей речовин, які розглянемо нижче. Приблизну величину проникання радіолокаційних хвиль у речовину можна оцінити як половину довжини хвилі, яку застосовують.

*Поляризація хвиль* – напрям коливань в імпульсах хвиль, які посилають спрямовані антени радіолокаційних систем (Р*Л*-систем), можуть бути орієнтованими, зокрема, вертикально (В-форма), чи горизонтально (Г-форма). Під час зустрічі з діяльною поверхнею Землі поляризований сигнал відбивається. Частина відбитого сигналу зберігає початкову поляризацію і повертається до випромінювально-приймальної антени радіолокатора як ВВ-форма,

[32] Ці кодові позначення застосовують з часу Другої світової війни.

чи ГГ-форма однорідної поляризації. Інша частина прихідного до Землі сигналу, зазнавши множинних відбиттів та фазових переходів, деполяризується, і відбиті коливання відбуваються в різних орієнтаціях стосовно вертикалі та горизонталі від напрямку руху хвиль. З огляду на це радіолокаційні системи повинні бути обладнані приймальними антенами, здатними сприймати ГВ і ВГ – відбиті сигнали, які несуть додаткову інформацію про земну поверхню.

Найсильніша деполяризація хвиль відбувається на ділянках земної поверхні, покритих рослинністю, де множинність відбиттів зумовлена стовбурами, гілками, сучками, листям, що мають дуже різну, а часто і нестабільну (залежну від подувів вітру) орієнтацію. Зіставляння знімків, отриманих Р*Л*-системами в однорідно (вертикально, горизонтально) поляризованих променях зі знімками, отриманими в різних поляризаціях, дає змогу розрізняти рослинні ценози, диференціювати поверхню за рослинними ознаками.

***Кут*** *падіння радіопроменя* на земну поверхню, визначений від вертикалі в пункті спостереження, значно впливає на взаємодію між посланим радіосигналом від локатора і поверхнею Землі. Якщо поверхня рельєфу орієнтована на антену радіолокатора (доантенна експозиція), то більша частина потужності радіосигналу буде відбита назад до антени. Коефіцієнт відбиття досягає максимуму за умови розташування відбивної поверхні перпендикулярно до напрямку посланого радіопроменя. Відповідно до цієї специфіки відбиття на радіолокаційному знімку найсвітлішими фототонами зобразять усі ті поверхні, які мали найвищий коефіцієнт відбиття. Ними виявляться поверхні, що мали орієнтацію, звернену до антени радіолокатора і звернені до траєкторії польоту носія Р*Л*-системи. Всі інші поверхні – горизонтальні, чи нахилені в протилежний бік від антени радіолокатора, зобразяться сірими фототонами різної оптичної щільності. Якщо поверхні елементів рельєфу мають нахил зворотний від антени (відантенна експозиція), і при цьому кут їхнього нахилу є більшим від кута візіювання радіопроменя, то на такі схили (поверхні) промені радіолокатора потрапляти не будуть, і вони виявляться в так званій власній радіотіні. Такі поверхні не дадуть відбитого сигналу і на знімках зобразяться чорним фототоном. Подібно зобразяться також об'єкти, до яких промені радіолокатора не дійдуть через

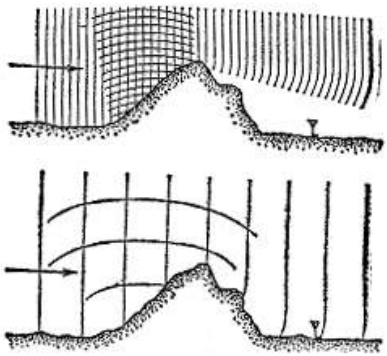


Рис. 2.22. Відбиття радіохвиль формами рельєфу і формування радіотіні радарів (верхня частина рисунка) та огинання цих перешкод довгими хвилями (нижня частина рисунка).

якийсь бар'єр на шляху променя, що зумів відбити промені, послані РЛ-системою. Довжина радіотіней зростає разом зі збільшенням відстані від радіолокатора. Прояв та розміри радіотіней значно модифікуються висотою польоту носія РЛ-систем та висотою об'єктів, які спричинюють затінення (рис. 2.22).

Водні поверхні, які можна розглядати як абсолютно плоскі поверхні стосовно радіопроменів локатора, зобразяться на знімках дуже темним фототоном.

Отже, завдяки специфіці формування зображення на радіолокаційних системах добре зображуються рельєф та рослинність, причому саме зображення набуває ілюзорно об'ємного характеру. Це полегшує розпізнавання рельєфу, виділення різно та однаково орієнтованих схилів, виявлення крутих схилів, лінеаментів, розломів, тощо. Проте варто зазначити, що на радіолокаційних знімках підсилюються ті елементи рельєфу, які за своїм простяганням збігаються з напрямком руху радіолокатора і, навпаки, ті елементи рельєфу, що мають простягання перпендикулярне до напрямку руху носія радіолокаційної системи виявляються приглушеними, фототоново згладженими. У зв'язку з такою специфікою планувати польоти з метою отримання Рл-знімків потрібно в напрямках, паралельних до простягання основних елементів рельєфу, наприклад, вздовж простягання Карпат. Для найбільш повного виявлення характеру території можна планувати знімання в двох взаємно перпендикулярних напрямках.

*Інтенсивність відбитих від земної поверхні радіосигналів* може змінюватися в мільйони разів. Радіохвилі дуже добре відбивають провідники (наприклад, метали) і погано – найбільш поширені в природі ізолятори (діелектрики), які для них прозорі. Тому влітку земна поверхня краще відбиває радіохвилі, ніж взимку, а зволожені ділянки місцевості – краще, ніж сухі.

Простежується тісний зв'язок між інтенсивністю відбитого сигналу, вологістю ґрунту та насиченістю води солями. З цієї ж причини солона вода і лід дають інтенсивніші віддзеркалення, ніж прісні. У той самий час за інтенсивністю відбитого радіосигналу не можна відрізнити тонкий рівний лід від чистої спокійної водної поверхні.

Давно було досліджено явище віддзеркалення мікрохвиль від дощової завіси. Причому енергія відбитих радіохвиль пропорційна інтенсивності опадів. Це дає змогу виявляти межі розповсюдження опадів. Радіохвилі відбивають не тільки дощові краплі, але навіть зграю сарани, тому радарне знімання часто використовують для спостережень за її міграцією, яка здійснюється вночі.

Експерименти показали помітну кореляцію між інтенсивністю віддзеркалення радіохвиль НВЧ-діапазону і біофізичними показниками рослинності (вага зеленої маси, вологовміст рослинного шару, густина рослин). Наприклад, за інтенсивністю відбитого сигналу на довжині хвилі 8,6 мм вдається розрізняти цукровий буряк, кукурудзу, люцерну, пшеницю і т.п.

Під час знімання водних поверхонь з хвилями інтенсивність віддзеркалення в радіодіапазоні залежить від поляризації зондуючого сигналу. Чим більше хвилювання, тим більша відмінність інтенсивності відбитих сигналів різної поляризації. Загалом для земної і водної поверхонь коефіцієнт розсіяння при вертикальній поляризації випромінювання вищий, ніж при горизонтальній. Реєстрація відбитих сигналів різної поляризації дає змогу надійніше характеризувати об'єкт або явище.

Цінною властивістю радіовипромінювання є його проникна здатність. Глибина проникнення залежить від довжини хвилі випромінювання і від властивостей поверхні, головно її діелектричної проникності. Як приклади зазначимо, що короткі радіохвилі рослинність розсіює, а довгі проникають крізь неї. Проникнення радіохвиль у воду значно гірше, ніж у ґрунт. У прісну воду радіовипромінювання проникає краще. Цим можна скористатися під час досліджень морських акваторій з різною солоністю. Під час зондування короткими хвилями глинистих вологих ґрунтів глибина проникнення ЕМХ становить міліметри, при застосуванні довших хвиль для зондування сухих піщаних ґрунтів – десятки метрів. Віддзеркалення радіохвиль змінюється за наявності

неоднорідностей у шаруватій будові сухих ґрунтів, наприклад, за наявності зволожених шарів, чи водоносних горизонтів, які інтенсивно відбивають радіохвилі, або глибинних розломів під покривом пухких відкладів. Ці властивості використовують для пошуку артезіанських басейнів, водоносних шарів, лінз ґрунтових вод, а також для визначення глибини їхнього залягання. Тут вдається досягти глибин у десятки, а у разі сухих верхніх ґрунтів, сотні метрів.

Окрім методів дистанційного зондування Землі за допомогою генерованих радіохвиль, штучне (генероване) випромінювання є основою радіозв'язку між Землею та її штучними супутниками, які виконують різні програми ДЗЗ, для наддалекого планетарного радіо- і телезв'язку, міжматерикового мобільного зв'язку, у радіогеографії, геофізиці, у військовій справі (зокрема, для забезпечення польотів крилатих ракет), а також для дослідження космосу (радіоастрономія).

### *2.2.5. Вплив атмосфери на висхідне випромінювання*

Повітряне і космічне знімання виконують на значній дистанції від об'єктів. Поміж об'єктом знімання (Землею) та знімальною апаратурою розташована якась частина або вся товща атмосфери, яка не є інертною до проходження ЕМХ, а відчутно на них впливає. У підрозділі 2.2.1 зазначено про специфіку проходження ЕМХ від основного їхнього джерела випромінювання Сонця до Землі, наголошено на ослабленні через відбивання, поглинання, розсіювання та фільтрацію. Проте і на зворотному шляху від поверхні Землі в космічний простір атмосфера також здійснює свій вплив, що позначається вже не на інтенсивності опромінення земної поверхні та спектральному складі опромінення, а на інформації, яку несуть ЕМХ, відбиті чи випромінені діяльним шаром земної поверхні. Також від проходження через атмосферу випромінювання Землі залежить навіть проста можливість спостерігати наземні об'єкти, виразно чи "розмито" їх бачити та фіксувати засобами ДЗЗ, що визначає, по суті, якість знімків. З огляду на це трансформація променів, які несуть інформацію від Землі на шляху до реєстраторів є дуже небажаною, однак неминучою природною умовою здійснення ДЗЗ.

Найбільш серйозною перешкодою для дистанційних досліджень є *хмарність*. Статистика показує, що в кожен момент часу хмари закривають від спостерігача з-за меж тропосфери більшу частину площі земної поверхні. У середньому для Землі тільки один день з десяти – ясний. Навіть малопотужні хмари блокують все оптичне випромінювання, оскільки скупчення водяних крапель сильно відбиває, розсіює і поглинає хвилі ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного діапазонів.

Аерофотознімання при високих перисто-купчастих і висококупчастих хмарах дає змогу отримати знімки зі слабовираженими тінями, які дещо спотворюють зображення поверхні Землі. Густі перисто-шаруваті хмари під час знімання в оптичному діапазоні ЕМХ з космосу закривають земну поверхню. Хмари середнього ярусу знижують освітленість земної поверхні на 1/3, а нижнього у 2–4 рази. За наявності розрідженої хмарності найкраще освітлюються горизонтальні поверхні, а освітлення схилів змінюється ситуативно, залежно від експозиції схилів до Сонця та від освітлених сонцем хмар, що відбивають світло Сонця до Землі. На аерофотознімках, отриманих у хмарну погоду з-під хмар, зникають тіні, рослинність зображена світліше, тональна структура зображення зумовлюється винятково різницею у відбивній здатності об'єктів. Фототон зображення об'єктів краще корелює з властивостями самих об'єктів, а не з умовами освітлення. Під час знімання сильно розчленованих районів у м'якому освітленні отримують хороші результати. Проте досягти безтіньового знімання з малих висот під хмарами майже не можливо, оскільки дуже рідко складаються відповідні метеорологічні умови. Під час космічного знімання у всіх видах, крім радарного, хмарність служить перешкодою для знімання поверхні.

*Безхмарна атмосфера є* напівпрозорим середовищем. Взаємодіючи з випромінюванням, вона перетворює його, змінюючи спектральний склад, інтенсивність, напрям розповсюдження випромінювання.

Атмосферний вплив прямо залежить від маси повітряного шару, через яке проходить випромінювання. Тому воно росте зі збільшенням висоти і кута спостереження. Оскільки щільність повітря зі збільшенням висоти швидко зменшується, вважають, що головний вплив на реєстровані параметри випромінювання

надає маса атмосфери, зосереджена в приземному шарі, який становить 10–12 км. Під час знімання з літаків, які летять на такій висоті, довжина шляху променів до об'єктів, розташованих на периферії, охопленої об'єктивом з кутом зору 45°, досягає вже 14–17 км, що суттєво впливає на якість зображення на периферії знімка.

Атмосфера є сумішшю газів і водяної пари із завислими в ній частинками. Не всі компоненти атмосфери однаково активно взаємодіють з випромінюванням. Найбільше впливають водяна пара, озон, вуглекислий газ, кисень, а також аерозолі. На розповсюдженні радіохвиль також позначаються іонізовані шари іоносфери на висотах від 60 до 400 км.

Відомо, що основний газовий склад атмосфери Землі відрізняється постійністю, а вміст вологи, аерозолів, концентрація іонізованих шарів схильні до безперервних змін у часі і просторі.

Висхідне електромагнітне випромінювання, проходячи крізь атмосферу, також *зазнає рефракції й ослаблення внаслідок поглинання, розсіяння і віддзеркалення променів*. Величина атмосферної дії залежить від конкретного стану атмосфери, зумовленого метеорологічними показниками (температурою, вологістю, густиною, тиском), а також від її стратифікації[33] та контрастності властивостей кожного з шарів.

*Атмосферна рефракція.* Під час дослідження об'єктів засобами аерокосмічної техніки реєструються не тільки інтенсивність електромагнітного випромінювання, а й точний напрямок його розповсюдження, що дає змогу знати розміщення об'єктів та інші їхні геометричні характеристики (розміри, форми).

Відомо, що оптичні і короткі радіохвилі розповсюджуються в атмосфері не завжди по прямій лінії. Явище зміни напрямку руху променів ЕМХ, яке називають рефракцією, пояснюється тим, що електромагнітні хвилі, проходячи через атмосферу, зустрічають на своєму шляху шари повітря з різною щільністю та з різними коефіцієнтами заломлення. Інформація про коефіцієнт заломлення для різних шарів атмосфери дає змогу оцінити величину рефракції. Вона порівняно невелика, а тому

[33] Стратифікація – розшарування атмосфери загалом, а також розшарування тропосфери на шари повітря з певною температурою та вологістю, ламінарним чи турбулентним рухом, інверсійними властивостями, термоклинами, прошарками та лінзами аномального складу.

її враховують тільки при високоточних фотограмметричних вимірюваннях.

*Поглинання*. Випромінювання, проходячи крізь атмосферу, поглинається нею. Ступінь поглинання (абсорбція) випромінюваних хвиль атмосферними компонентами виявляє виразний спектральний хід. Залежність поглинання від довжини хвилі має складний характер, виявляючи наявність чітко окреслених, але різних за шириною і глибиною смуг поглинання.

Спектри поглинання хвиль атмосферними газами мають тонку структуру, тобто багато вузьких смуг поглинання. Зокрема, на ділянці спектра 7–14 мкм їх виявлено близько 400. Вузькі смуги поглинання можуть помітно ослабляти навіть монохроматичне випромінювання лазерів.

*Розсіяння*. Випромінювання, що пронизує атмосферу, зазнає розсіяння молекулами газів, частинками аерозолю і неоднорідностями, спричиненими турбулентними рухами в атмосфері. Просторовий розподіл розсіяного випромінювання характеризується індикатрисою розсіяння, яка має різну форму. Зі зростанням концентрації та розмірів елементів, що розсіюють ЕМХ, індикатриса розсіяння витягується в напрямку розповсюдження випромінювання. Розмір розсіюючих елементів впливає не тільки на індикатрису розсіювання, а й на спектральний склад та поляризацію розсіяної радіації.

Розрізняють два основні види розсіювання: молекулами газу і частинками аерозолю. Для елементів, значно менших від довжини хвилі, розсіяння, описане законом Релея, згідно з яким інтенсивність розсіяння зворотньо пропорційна четвертому ступеню довжини хвилі. Під час розсіювання молекулами повітря "синіх" ЕМХ з космосу спостерігають голубу планету Земля. Зі збільшенням частинок аерозолю всі промені починають розсіюватися більш рівномірно. При розмірах частинок понад 1–2 мкм, що співрозмірні з довжинами хвиль далекого інфрачервоного та надвисокочастотного діапазонів, інтенсивність розсіювання "кольорів" вже не залежить від довжин хвиль (білуватий тон повітря і димки). Замість розсіювання за цих умов сильніше проявляється поглинання (сіра димка).

Отже, найсильніше молекулами атмосферних газів розсіюється і поляризується короткохвильове випромінювання, причому

воно селективне ("голуба димка" – розсіювання Релея). Аерозольне розсіювання є нейтральним, сильно залежне від концентрації аерозольних частинок, чинить вплив також і на довгохвильове оптичне випромінювання. Зі збільшенням висоти, яке супроводжується зменшенням концентрації аерозолю, в атмосфері переважає релєєвське розсіювання. У приземному шарі аерозольне розсіювання може перевершувати молекулярне у багато разів. Якщо молекулярному розсіюванню властива постійність (воно майже не залежить від часу і місця), то аерозольне схильне до великих змін як в часі, так і в просторі, бо залежить від запиленості, задимленості та туманності приземних шарів атмосфери. Саме тому запилені наземні об'єкти (міста чи пустелі з пиловими бурями з космосу виглядають сірими).

*Прозорість атмосфери*. Головне ослаблення випромінювання під час проходження через атмосферу відбувається внаслідок розсіювання і поглинання, які діють незалежно й одночасно. Зі зміною довжини хвилі ослаблення через розсіювання міняється плавно, а через поглинання, яке має селективний характер – різкіше і нерівномірно. За певних метеорологічних умов (мла, туман) ослаблення випромінювання через розсіювання може значно перевищувати ослаблення через поглинання, і навпаки. Це залежить від концентрації в атмосфері водяної пари, крапель води, кристаликів снігу, сажі, рослинного пилку, різних димових інгредієнтів.

Відомо, що залежність інтенсивності монохроматичної радіації ***I*** від довжини шляху ***i*** в однорідному ослаблюючому середовищі, визначають за експоненціальним законом Бугера–Ламберта:

$$I=I_0e^{-ki},$$

де $I_0$ – інтенсивність випромінювання, що припало на середовище послаблення; $e$ – основа натуральних логарифмів ($e$≈2,718 ); $k$ – сумарний коефіцієнт послаблення, що складається з коефіцієнтів розсіяння та поглинання і характеризує ослаблююче середовище незалежно від його товщини. У міру проникнення променистого потоку в товщу середовища, він систематично послаблюється і тим швидше, чим більший коефіцієнт послаблення. Якщо товщина шару зростає в арифметичній прогресії, то інтенсивність випромінювання падає в геометричній прогресії.

Від оптичної товщі залежить власне прозорість атмосфери, яку характеризує коефіцієнт прозорості:

$$T=e^{-ki}.$$

Для ідеально прозорої атмосфери, цей коефіцієнт дорівнює *одиниці*, а зі зменшенням прозорості ця величина прямує до *нуля*. Для території України середнє значення коефіцієнта прозорості для зорових променів становить приблизно 0,75.

Атмосфера подібно до фільтра пропускає промені різних довжин хвиль селективно, вибірково. Вище ми зазначили, що для ультрафіолетового випромінювання атмосфера майже непрозора. Однак для "відземного" випромінювання це не має практичного значення, бо в ньому ультрафіолетові промені майже відсутні (за винятком відбитих хвиль над сніжними поверхнями). У міру переходу в довгохвильову частину спектра оптичних хвиль трапляються ділянки – так звані *вікна прозорості*, де коефіцієнт прозорості для певних хвиль порівняно великий, хоча і не завжди дорівнює одиниці. Нижче наведено кілька рисунків різних авторів з оцінкою прозорості атмосфери для хвиль, які використовують у дистанційному дослідженні Землі. Різниці оцінок показують приблизність параметрів, що зумовлено мінливістю результатів експериментальних вимірювань при різних станах атмосфери (рис. 2.23–2.26).

Найбільше практичне значення в оптичному діапазоні мають вікна прозорості у зоровому (0,4–0,8 мкм) та інфрачервоному діапазонах (3–5 мкм, а також 8–12 мкм).

Міліметрові та субміліметрові радіохвилі також зазнають молекулярного поглинання в газах, які складають атмосферу, – в кисні та водяній парі. У міліметровому діапазоні з чотирьох вікон прозорості найбільше значення має вікно для довжини хвилі 8,6 мм. Молекулярне поглинання перестає бути помітним при довжинах хвиль понад 1–2 см. Міліметрові радіохвилі так само, як і світлові, поглинаються гідрометеорами. Туман, дощ, сніг є перешкодою для них. Лише сантиметрові хвилі завдовжки більше 3–5 см починають вільно проходити крізь гідрометеори. Вікна прозорості для цих довжин використовують для теплового та надвисокочастотного зондувань землі.

Хвилі дециметрового діапазону безперешкодно проходять всю товщу атмосфери. Саме ця особливість зробила хвилі цього діа-

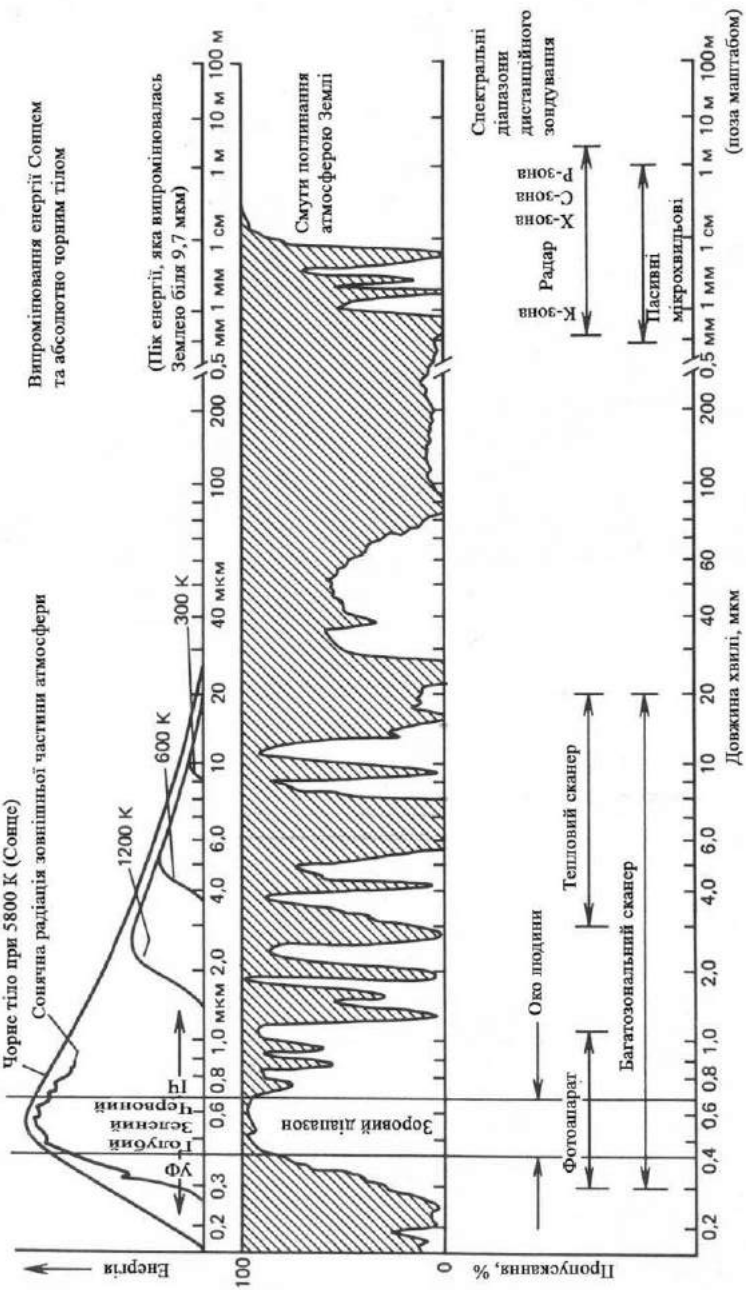



Рис. 2.23. Спектр електромагнітної енергії, прозорість атмосфери, та діапазони ЕМХ, який використовують у ДЗЗ [67].

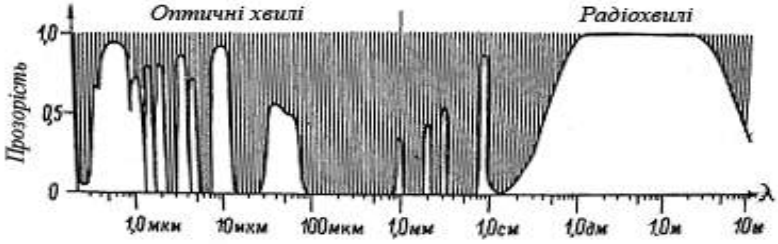



Рис. 2.24. Прозорість атмосфери для хвиль оптичного та радіодіапазонів [53].

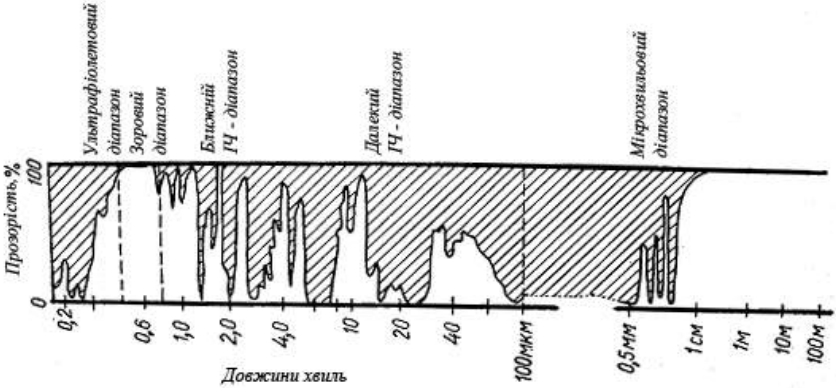



Рис. 2.25. Пропускання спектрів електромагнітних хвиль атмосферою Землі [81].

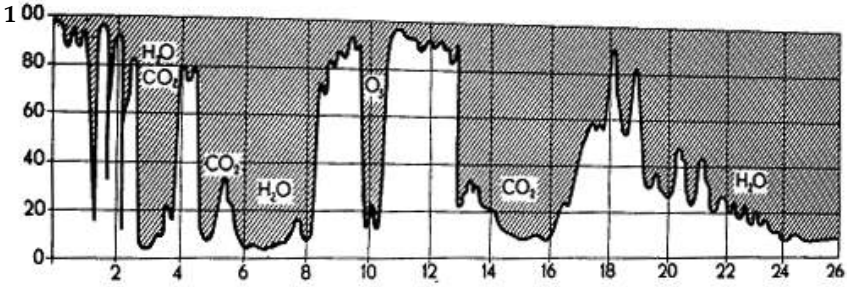



Рис 2.26. Пропускна здатність земної атмосфери стосовно інфрачервоного випромінювання [114]. Показана здатність селективного поглинання ЕМХ певних довжин інгредієнтами атмосфери (водою, вуглекислим газом та озоном). На осі абсцис довжини хвиль подані в мікрометрах.

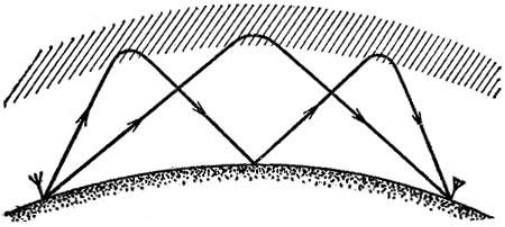


Рис. 2.27. Схема проходження радіохвиль від випромінювача поміж поверхнею Землі та йоносферою.

пазону основними для здійснення космічного радіозв’язку, радіотрансляцій, для передачі із Землі на супутники корекційної та командної інформації, а також для передачі з космосу результатів знімання “радіоканалами”.

Метрові хвилі (більше 10 м), вільно проходять через тропосферу, відбиваються від верхніх шарів атмосфери, які є йонізованими (рис. 2.27). Для таких хвиль йоносфера виявилася своєрідним м’яким[34] сферичним екраном, який багаторазово відбиває промені, що блукають між Землею та її йоносферою, забезпечують проходження радіосигналу від випромінювальних радіостанцій на багато тисяч кілометрів, на цілу земну кулю. При цьому екрануюча здатність йоносфери має деяку залежність від концентрації йонів та вільних електронів у йоносфері, що трансформується бомбардуванням атмосфери Землі потоками “сонячного вітру”. Інтенсивність його змінюється разом з активністю Сонця, з положенням Землі на своїй орбіті, а також сильно відрізняється на досонячній (денній) і тіньовій (нічній) сторонах атмосфери. У роки високої сонячної активності йонізація шарів йоносфери зростає, що збільшує віддзеркалення радіохвиль від йонізованих шарів йоносфери, і хвилі завдовжки понад 10–30 м не можуть пройти крізь йоносферу, повністю відбиваючись від неї.

*Атмосферне світіння.* Світло, яке потрапляє на деяку ділянку атмосфери розсіюється, не тільки послаблюється, а й освітлює сусідні ділянки. Це розсіювання призводить до таких явищ, як ранішні світанки та вечірні смеркання, що є своєрідним світінням атмосфери, джерелом освітлення Землі, яке також зумовлює й відбитий від земної поверхні потік світла. Яскравість повітряного світіння залежить від оптичної товщі атмосфери, її щільності,

[34] М’яким, бо метрові хвилі таки частково проникають у шар іоносфери і там поглинаються.

висоти Сонця і напрямку спостереження. Світіння атмосфери дещо спотворює реальне випромінювання Землі.

Атмосфера випромінює не тільки світлові, а й власні інфрачервоні і радіохвилі. Основну частину радіовипромінювання атмосфери створюють водяна пара і кисень. Зокрема, хмари й опади інтенсивно випромінюють у міліметровому діапазоні радіохвиль. Це випромінювання додається до потоку ЕМХ від Землі.

*Вплив атмосфери на оптичні характеристики об'єктів.* Вимірювальний прилад, що перебуває на деякій висоті над земною поверхнею, реєструє висхідне сумарне випромінювання, яке складається з випромінювання досліджуваного об'єкта (земної поверхні), перетвореного атмосферним шаром, та з випромінювання, продукованого та розсіяного цим шаром. Особливо суттєвий вплив атмосфери простежуються під час реєстрації випромінювання морської поверхні. Тут її (атмосфери) внесок може досягати 80%. Отже, оптичні характеристики об'єктів, визначені крізь товщу атмосфери, відрізнятимуться від характеристик, отриманих у безпосередній близькості від об'єктів. У разі висотного аерознімання (20–30 км) атмосфера позначається на якості знімків так само, як і під час космічного знімання.

Прозорість атмосфери і яскравість мли залежать не тільки від стану атмосфери, але й від кута візування. Наприклад, яскравість мли суттєво зростає під час візування навпроти Сонця.

Розрахунки показують, що під впливом атмосфери спостережувані контрасти можуть знизитися в 2–5 разів. Це передусім погіршує передачу деталей темних об'єктів.

Експерименти з визначення спектральних характеристик об'єктів, виконані з пілотованих космічних кораблів "Союз", які супроводжувалися синхронним аеро- і наземними спектральними вимірюваннями, показали, що атмосфера спотворює хід кривих спектральної відбивної здатності. У короткохвильовій (синьо-зеленій) частині спектра простежується суттєве збільшення коефіцієнтів спектральної яскравості, визначених з космосу, порівняно зі значеннями, отриманими на Землі. Ця відмінність поступово зменшується зі збільшенням довжини хвилі випромінювання, і в довгохвильовій частині видимого спектра воно стає порівняно невеликим. У короткохвильовій частині спектра атмосферна мла значно знижує спектральні контрасти між різними об'єктами ландшафту.

Віддзеркалення об’єктів класу “гірські породи і ґрунти” за даними космічних спектрометричних вимірювань має менший спектральний хід, а крива відбивної здатності більш згладжена, підвищення в червоній зоні спектра зменшене. Спостерігають загальне збільшення яскравості об’єктів. Відбивна здатність рослинного покриву не має такого ясно вираженого і характерного “зеленого” максимуму в зоні 0,55 мкм, як при наземних вимірюваннях. Це пояснюють тим, що атмосферна мла збільшує яскравість рослинності в синій частині спектра. У водних об’єктів, не зважаючи на загальне збільшення яскравості, атмосфера не спотворює характеру спектральної відбивної здатності. Збільшення коефіцієнтів спектральної яскравості в синій частині спектра зберігається. Криві відбивної здатності снігового покриву і хмарності різкіше знижуються в червоній зоні спектра. Для цих об’єктів зареєстровано пониження їхньої яскравості, визначеної з космосу, порівняно з аероспектрометричними вимірюваннями.

# Розділ 3

# ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗНІМАННЯ

## 3.1. Носії апаратури аерофото– і космічного знімання

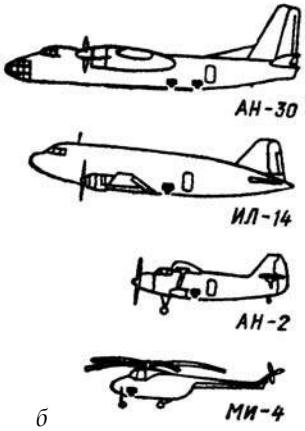
Для виконання знімання відповідну апаратуру встановлюють на носій, який піднімає її на потрібну висоту, переміщає щодо місцевості і забезпечує певне орієнтування в просторі. Крім знімальної апаратури, на носієві встановлюють цілий ряд додаткових приладів, необхідних для виконання знімальних робіт.

Носії знімальної апаратури ділять на дві основні групи – *авіаційні та космічні*. До особливої групи належать наземні і підводні носії. Найширше як носії апаратури використовують літаки і космічні апарати. Крім того, історія аерокосмічних методів знає багато прикладів застосування як носіїв знімальної апаратури ракет, аеростатів (прив'язних та у вільному польоті), повітряних куль, керованих по радіо чи з пульта дистанційного управління авіамоделей, повітряних змій і навіть птахів. У польових експериментах для установки апаратури над земною поверхнею використовують різного роду вежі, щогли і висотні автокрани.

### *3.1.1. Авіаційні носії*

Для аерофотознімань застосовують серійні літаки ІЛ-14, ІЛ-18, АН-2 і частково вертольоти, зокрема, Мі-4, Ка-18, які використовують здебільшого для аеровізуальних спостережень не-

*а*




*б*

Рис. 3.1. Авіаційні носії, з борту яких проводять аерофотознімання: *а* – літак-лабораторія АН-30, *б* – види носіїв за їхньою величиною.

великих ділянок у важкодоступних районах. У 70-х рр. у СРСР створено спеціальний літак-лабораторію АН-30 (рис. 3.1). У його носовій частині розміщена кабіна з хорошим оглядом для роботи штурмана. У ній встановлені оптичні візири та інше навігаційне устаткування для точного прокладання знімальних маршрутів. Літак АН-30 має кілька фотолюків для планового і перспективного знімань, в яких розміщують аерофотоапарати. Аерофотоапаратуру можна ставити на гіростабілізуючий пристрій, який утримує її в горизонтальному положенні. У літаку розміщують також радіовисотомір, літакову радіогеодезичну станцію, наукове устаткування. Сьогодні найчастіше на борту літака встановлюють високоточний сканер, наприклад, LIDAR (Light Detection and Ranging, Швей-

царія) чи комплекс ОРТОЛАЗЕР (Росія), який виконує лазерне сканування місцевості і за даними якого створюють її тривимірні моделі. Літаки, які зазвичай працюють у повітрі 5–10 год, застосовують для середньомасштабних досліджень об'єктів, які мало змінюються, а також для процесів, що повільно протікають. Авіаційними носіями користуються для проведення знімань, синхронних з космічними та для випробувань нової космічної апаратури.

До літаків, які використовуються для знімання, ставлять низку особливих вимог. Вони повинні забезпечувати зручний огляд місцевості в усіх напрямах. Швидкість польоту повинна бути достатньо малою (100–300 км/год), щоб не розмивалося зображення на знімку; максимальна висота польоту – не менше 5 км для рівнин, і 8 км у горах; запас палива – на 6–10 год польоту, щоб забезпечити великий радіус дії, особливо для роботи без дозаправки в малонаселених і важкодоступних районах. Аерознімальні літаки повинні злітати і сідати на коротких доріжках, бути невимогливими до злітної смуги, маневрені і стійкі в польоті. Межі коливань машини в польоті становлять: поздовжнє – від $\pm 1$ до 2°, поперечне – від $\pm 2°$ до 3°, по висоті – від $\pm 0{,}01$ до 0,02 висоти польоту.

Перед аерозніманням потрібно скласти проект льотно-знімальних робіт. Розраховують кількість маршрутів, які прокладають на карті польоту, визначають необхідну кількість льотного і льотно-знімального часу. На борту літака кріплять аерофотоапарати та інші знімальні пристрої, навігаційні прилади для знімання, які відповідають проекту.

### *3.1.2. Космічні носії*

За наявності сьогодні великої кількості різного роду носіїв знімальної апаратури їх доцільно класифікувати. Передусім космічні апарати можуть бути згруповані *за призначенням*. У цьому разі їх поділяють на науково-дослідні (для вивчення космічного простору і планет), прикладні (народногосподарські), для транспортування вантажів і людей у космічному просторі (в тім числі для врятування людей, що зазнали там аварії), для зв'язку між Землею та орбітальними апаратами (кораблями, супутниками, станціями), між Землею і Місяцем, планетами тощо, для обслуговування й ремонту тих апаратів, які перебувають на орбітах. ШСЗ залежно від призначення поділяють на *дослідницькі і технічні* (див. п. 3.1.2.1).

Класифікують космічні носії за кількістю головних завдань, які вони виконують. Тут виокремлюють два великих класи апаратів: *спеціалізовані і багатоцільові* (універсальні). Спеціалізованих апаратів, імовірно, нині створено більше, ніж багатоцільових. Вони призначені для здійснення якоїсь однієї дуже вузької мети. До них належать такі перші кораблі, як "Восток", "Восход", "Меркурій", розроблені спеціально для забезпечення самої можливості польоту людини в космос по орбіті супутника Землі і вивчення впливу умов польоту на організм людини. Таке формулювання завдання значно спростило загальні проблеми створення корабля, обмежило діапазон умов його роботи. До спеціалізованих апаратів належать супутники, які здійснюють метеорологічні спостереження з космосу, супутники зв'язку, зокрема, для забезпечення супутникового телефонного, телевізійного і мобільного зв'язку чи Інтернету, навігаційні супутники, вантажні типу "Протон" тощо. Імовірно, в подальшому тенденція спеціалізації збережеться поряд з тенденцією сполучення в одному апараті різних функцій.

Багатоцільові апарати виконують не одну, а кілька функцій. Космічний корабель "Союз", наприклад, є представником такого класу. Крім функцій, властивих "Востоку" і "Восходу", він має ще дві нові: стикування на орбіті й транспортування. Те саме стосується і кораблів серії "Аполлон", а також шатлів. Багатоцільовими апаратами є орбітальні навколоземні станції "Салют", "Скайлеб", "Мир", МКС, на яких, крім широких наукових спостережень, виконують різноманітні роботи прикладного значення.

За висотою знімання всі космічні апарати класифікують на *низько-* (100–500 км), *середньо-* (500–2 000 км) та *високоорбітальні* (36 000–40 000 км). Низькі орбіти – це орбіти пілотованих кораблів, орбітальних станцій і розвідувальних супутників. На низьких орбітах літали кораблі "Союз", супутники серії "Космос", перебували станції багаторазового використання "Салют", "Скайлеб", "Мир". Сьогодні на цих орбітах літають шатли і розташована МКС. Найхарактерніші висоти їхніх орбіт 200–400 км. Орбіти ресурсних супутників розташовані на висоті 600–900 км, а метеорологічних – вище ніж 900–1400 км. Середньоорбітальними є супуники серій "Метеор" (640 та 900 км), "Лендсат" (705 км), СПОТ (820 км) та ін. На високих орбітах перебувають геостаціонарні супутники, а також ті, що розміщені на видовжених еліпсоїдних орбітах. Ви-

сокоорбітальні спостереження ведуть з автоматичних міжпланетних станцій типу "Зонд", "Вега", "Марінер", "Венера". Надвисокі орбіти (понад 60 000 км) мають космічні апарати, які виконують знімання з орбіти Земля–Місяць, і міжпланетні.

*За вагою* космічні апарати, як і літаки, можна поділити на легкі, середні, важкі й надважкі. Цей поділ дуже умовний. Апарат, який сьогодні вважають важким (наприклад, "Протон"), завтра може перейти до легшої категорії. Зазначимо, що найлегшим серед всіх земних супутників був другий американський супутник. Його вага нагадаємо становила лише 1,5 кг. Вага Міжнародної космічної станції близько 400 т.

*За наявністю екіпажу* космічні апарати класифікують на автоматичні (ненаселені), обслуговувані (періодично населені) й постійно населені. Усі три типи апаратів цього класу існують і розвиваються паралельно. Автоматичні космічні апарати – це штучні супутники Землі. Обслуговувані апарати – це, наприклад, орбітальна станція "Мир". У зв'язку з відсутністю фінансування на початку 90-х років, станція якийсь час лишалася в автоматичному польоті. У середині і в кінці 90-х її час від часу відвідували російські та міжнародні екіпажі, відновлювали ті чи інші зовнішні й внутрішні пристрої, які вийшли з ладу, перезаряджали окремі системи, вивозили нагромаджену інформацію тощо. Постійно населеним космічним апаратом є Міжнародна космічна станція, на якій працюють міжнародні екіпажі, що змінюють один одного кожних півроку.

Населені космічні апарати можна класифікувати за кількістю місць. Ми вже є свідками застосування одномісних кораблів ("Восток", "Меркурій"), двомісних ("Джеміні"), тримісних ("Союз", "Восход", "Аполлон") та семимісних шатлів.

Космічні апарати поділяють і *за способом застосування*. Варто вирізнити апарати одноразового й багаторазового застосування. Одноразовими є більшість космічних апаратів, частини яких ще під час старту, а потім під час спуску залишаються в космосі або згоряють в атмосфері. На Землю спускається лише капсула з космонавтами або апарат з фото- чи відео матеріалами. Для повторних запусків такі капсули не використовували. Прикладом космічних апаратів багаторазового використання є шатли та орбітальні станції.

Апарати можуть бути *нездатними до маневрування* (рухаються по фіксованих орбітах), *здатними до маневрування* у площині орбіти (за рахунок зміни форми орбіти, її перигею та апогею) *і такі, що змінюють кут нахилу орбіти* у відношенні до площини екватора Землі. Крім того, апарати можуть бути або зовсім неорієнтовані (і нестабілізовані) відносно центра маси, або орієнтовані дискретно, або ж така орієнтація і стабілізація обов'язково повинні здійснюватися протягом всього часу активного перебування корабля на орбіті (для додержання напряму його осей на якесь небесне тіло, наприклад, Землю, Місяць, Сонце тощо).

Усі види маневрів потребують витрат більшої або меншої кількості робочого палива, а ним не завжди можна запастися на всі потреби (через вагу апаратів та обмежені енергетичні можливості ракет-носіїв). Особливо багато енергії і витрат робочої речовини потрібно для зміни кута нахилу орбіти космічного апарата. Для деяких апаратів орієнтація і стабілізація, а також маневрування необов'язкові (так було на перших супутниках). Більшість апаратів сьогодні є здатними до маневрування з програмним забезпеченням їхньої орієнтації і стабілізації.

*За траєкторією* польоту космічні апарати класифікують на штучні супутники Землі, Місяця, апарати з досліджень інших планет та міжпланетні.

*За способом зниження* космічні апарати бувають некеровані (з балістичним спуском) і керовані (з використанням аеродинамічних сил). За способом приземлення (приводнення) – це апарати з жорстким і м'яким приземленням.

Серед космічних носіїв знімальної апаратури розрізняють *штучні супутники Землі (ШСЗ), пілотовані космічні кораблі* та *орбітальні космічні станції* і комплекси. Розглянемо їх детальніше.

***3.1.2.1. Штучні супутники Землі (ШСЗ).*** Перевагою ШСЗ є змога регулярно і тривало спостерігати за земною кулею. Які б не були багаті за змістом космознімки, отримані космонавтами з пілотованих космічних апаратів, вони не дають повного і систематичного покриття земної поверхні. Лише завдяки ШСЗ є змога безперервного отримання зображень Землі і швидкої їхньої передачі на приймальні станції.

Характерною особливістю ШСЗ є їхні визначені *орбіти*. Їх поділяють за віддаленістю від Землі, формою, кутом нахилу до площини екватора і синхронністю. Характеристики орбіт див. п. 3.2.

Усі штучні супутники Землі класифікують на дві великі групи – технічні і дослідницькі. Технічні – це супутники зв'язку і навігаційні. Супутники зв'язку забезпечують ретрансляцію електромагнітних сигналів між наземними станціями, розташованими далеко одна від одної. Вони служать для забезпечення радіотелефонного, телеграфного, телевізійного та інтернет-зв'язку між континентами, а також всередині країни. Супутники можуть безперервно ретранслювати сигнали. Ресурс роботи – 5–7 до 10 років.

*Навігаційні* супутники призначені для визначення положення кораблів, літаків, автомобілів та фізичних осіб стосовно нього. Вони літають на висоті близько 20 000 км, мають значну масу (~ 900 кг) і невеликі розміри (понад 5 м з винесеними сонячними батареями). На Землі сигнал від супутника вловлюють за допомогою *GPS-приймачів*. GPS (Global Position System – глобальна система позиціювання) ґрунтується на визначенні свого місцеположення за напрямами та відстанями до супутників. Це означає, що координати деякого об'єкта на Землі обчислюють за допомогою тригонометричних співвідношень на основі вимірювання відстаней до групи супутників у космосі. ШСЗ при цьому виконують роль точно координованих точок відліку. GPS працює, вимірюючи час, за який радіосигнал супутника доходить до приймача на Землі, а потім за цим часом обчислює відстань. Хоч навігаційні супутники виводять дуже точно на геостаціонарні орбіти, їхнє положення неперервно обчислюють на Землі. Після того, як одна зі станцій стеження визначила положення ШСЗ й обчислила поправки у його орбіті, цю оновлену інформацію передають знов на супутник, замінюючи попередню в пам'яті його бортового комп'ютера. Отже, щоб визначити координати місця на Землі, потрібно врахувати як відстані до супутників, так і місцезнаходження ШСЗ у космічному просторі. Для визначення трьохвимірного розташування (довгота, широта і висота точки) потрібно отримати інформацію щонайменше з чотирьох супутників. Місцезнаходження об'єкта визначають з точністю до трьох-п'яти метрів. У диференціальних GPS (DGPS), які застосовують для геодезичних робіт, забезпечується точність до сантиметра. Прикладами супут-

никових систем позиціювання є російська система "Глонасс" та американська NAVSTAR (~ 24–26 супутників, з них 5 запасних). Навігаційною є європейська система "Галілео", перший супутник якої запущений ще у лютому 1978 р.

Дослідницькі супутники бувають геофізичні, астрономічні, метеорологічні та ресурсні. *Геофізичні* супутники застосовують для вивчення верхніх шарів атмосфери і найближчого до Землі космічного простору. До них належать російські супутники серії "Космос", американські "Геос", "Сісат", "ОАО". *Астрономічні* супутники Землі – це літаючі обсерваторії, винесені за межі земної атмосфери й обладнані астрономічними приладами для спостережень за зірками, планетами і Сонцем.

*Метеорологічні* супутники здійснюють безперервне знімання денної і нічної сторін Землі сканерами у видимій та інфрачервоній частинах спектра ЕМХ. Метеорологічні системи з космічними апаратами на низьких приполярних орбітах забезпечують вирішення таких головних завдань: моніторинг хмарного покриву Землі й інших погодних явищ; вимірювання вертикального профілю температури атмосфери, характеристик приповерхневого вітру і температури поверхні морів; отримання інформації про стан навколоземного космічного простору; збір інформації з платформ геофізичного моніторингу навколишнього середовища; прийом і ретрансляція сигналів лиха в рамках системи пошуку і порятунку "Коспас"/Sarsat, а також визначення місцеположення джерел цих сигналів.

До метеорологічних належать американські супутники серій "Тайрос", "Німбус", "ESSA", "NOAA", "GOES" (США), колишні радянські серії "Метеор" і сучасні російські "Електро", європейські "Метеосат", японські "GMS", індійські INSAT, китайські FY-2. Розглянемо деякі з них детальніше.

Одними з перших метеорологічних супутників була серія американських супутників "Тайрос" ("*TIROS*" – Television and Infrared Observation Satellite), запущених у 1960 р. Вони мали невеликий нахил до площини екватора (48–58°), тому більше проводили знімання у тропічних широтах і вперше надали інформацію про шляхи руху руйнівних тропічних циклонів. Для них полярні і приполярні області залишались поза зоною спостережень. Наступне покоління "Тайросів" – дев'яте і десяте були виведені на

субполярні орбіти (80°), що забезпечило майже повний щоденний глобальний огляд Землі. З цього часу всі метеорологічні супутники виводять на субполярні орбіти. Знімки, отримані з "Тайроса", – перспективні, роздільної здатності 3 км в центрі знімка. З 23 тис. переданих цим супутником знімків для вивчення поверхні суші якісним був лише 1%. На інших була зображена хмарність або океан, ще частина знімків мала багато технічних недоліків. Експлуатація останнього супутника цього покоління, "Тайрос-10", була припинена в липні 1967 р.

Друге покоління американських супутників – "*Німбус*" (1964–1973 рр.) вели знімання з більшою роздільною здатністю (0,8 км), а їхні знімки вже не були перспективними. У денний час працювали телевізійні камери, в нічний – інфрачервоні давачі. Аналіз цих знімків був застосований для вирішення багатьох географічних задач.

Паралельно до "Німбуса" у 1966 р. запущена серія супутників "*ESSA*". На цих супутниках розв'язувалась задача повного огляду Землі при можливо меншій кількості знімків завдяки зменшенню їхнього масштабу і збільшенню оглядовості. Тому знімки "ESSA" охоплювали значну площу (біля 6 млн км$^2$) і мали малу роздільну здатність – 2,8 км в центрі знімка і 8,3 км – на краях. Вони забезпечили регулярний глобальний огляд Землі. Їх використовували здебільшого для штормових попереджень та аналізу типів атмосферної циркуляції.

За програмою *NOAA* (National Oceanic and Atmospheric Administration – організації, яка досліджувала атмосферу та океани) працювали перші супутники "Тайрос". Наступне покоління супутників серії NOAA – це TOS (1966–1970) та ITOS (1970–1976). Про масштабність тодішніх спостережень засвідчує те, що з 1966 по 1970 рр. було розгорнуто до 400 наземних станцій, які приймали дані зі супутників "NOAA" на користь метеорологічних служб 45 країн. Сучасне покоління американських метеорологічних супутників "NOAA" бере свій початок від серії супутників "TIROS-N" і "ATN" ("Advanced Tiros-N"), виведених відповідно у 1978 та 1983 роках на геліосинхронну колову полярну орбіту висотою 1450 км. Нахил до екваторіальної площини становив 101°, маса супутника близько 340 кг.

Орбітальний сегмент сучасної системи "NOAA" охоплює два оперативні космічні апарати (рис. 3.2). Запуски ШСЗ, гаран-

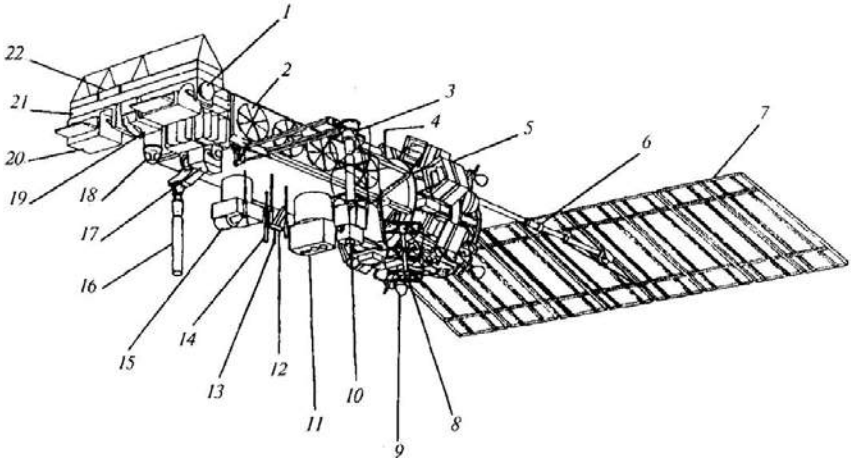



Рис. 3.2. Космічний апарат NOAA серії ATN [22]:
*1* – радіометр AVHRR, *2* – стулки системи термостабілізації (4), *3* – антена апаратури пошуку і порятунку, *4* і *13* – ненаправлена антена S-діапазону, *5* – акумуляторні батареї (6), *6* – двигун приводу сонячної батареї, *7* – панель сонячної батареї, *8* – передавальна антена УКХ-діапазону, *9* – блок реактивних двигунів (4), *10* – апаратура SBUV-2, *11* – радіометр несканувальний ERBE, *12* – радіомаяк/антена приймання командно-програмної інформації, *14* – антена S-діапазону, *15* – радіометр сканувальний ERBE, *16* – антена системи збору даних з наземних метеоплатформ, *17* – пристрій MSU, *18* – блок давачів Землі, *19* – пристрій SSU, *20* – пристрій HIRIS, *21* – платформа кріплення приладів ДЗЗ, *22* – інерціальний давач.

тований термін служби яких становить два роки, здійснюють із Західного ракетного полігону США. Супутники виводять ракетиносії “Atlas” на сонячно-синхронні орбіти з нахилом біля 98,8° і з висотами близько 830 або 870 км. Висоту орбіти, на яку чергово запускають ШСЗ вибирають так, щоб різниця в орбітальних періодах двох оперативних супутників системи кожного разу становила близько 1 хв., завдяки чому вдається уникнути ситуації, в якій обидва супутники щодня здійснюють знімання одних і тих самих ділянок на поверхні Землі в один і той самий час доби. Крім того, орбіта одного з оперативних супутників характеризується ранішнім (6.00–10.00 год) місцевим часом перетину екватора в нисхідному вузлі, а другого – післяполудневим (14.00–18.00 год) часом перетину екватора у висхідному вузлі орбіти. Роздільна

здатність знімків "NOAA" – 1 км. Чіткість знімків виразна, добре передана гама напівтонових контрастів. За ними вивчають не тільки розподіл хмарності, а й визначають вегетаційні індекси рослинності, місця виникнення пожеж, надзвичайних ситуацій, проводять моніторинг стану природного середовища в регіональному масштабі. Зі супутників "NOAA" отримує інформацію й українська метеослужба.

Гідрометеорологічними супутниками у Радянському Союзі були супутники серії "*Метеор*", які почали працювати з 1967 р. Першими супутниками цього типу були "Космос-144" і "Космос-156", які утворили експериментальну метеорологічну систему спостереження. Надалі на навколоземну орбіту систематично виводились нові метеосупутники, які сформували постійну космічну систему служби погоди. Сучасні ШСЗ "Метеор-3М" рухаються по коловій субполярній орбіті з нахилом 98°, висотою 900 км і періодом обертання 91 хв. Маса на орбіті становить 2215 кг, з них 700 кг припадає на корисне навантаження. Ці супутники Росія виводить на орбіту з полігону Плєсєцк під Москвою. На супутниках серії "Метеор" були вперше встановлені замість кадрових телевізійних камер сканувальні системи, а також інфрачервона апаратура. Смуга огляду становить біля 1 000 км. Отримують знімки роздільної здатності 1,3 км в центрі і 2 км на краях. Супутники добре зорієнтовані і стабілізовані, що дає змогу отримувати планові зображення поверхні. Термін роботи перших супутників на орбіті становив кілька місяців, потім вони замінювались новими, і система продовжувала роботу. Зараз термін роботи цих супутників становить два-три роки, протягом всього періоду екплуатації їх виведено на орбіту більше 50-ти. Головними завданнями, які виконували на борту системи "Метеор" є отримання глобальних зображень хмарності і підстильної поверхні у видимому та інфрачервоному діапазонах спектра; отримання глобальних даних вертикального профілю температур; безперервне спостереження за потоками проникних випромінювань у навколоземному просторі.

Міжнародна супутникова система "Метеосат" ("*Meteosat*") базується на геостаціонарних космічних апаратах і призначена для вирішення задач глобального метеорологічного забезпечення споживачів у європейському, азійському та африканському регіонах. Створення і вивід на орбіту космічних апаратів серії "Метеосат", а

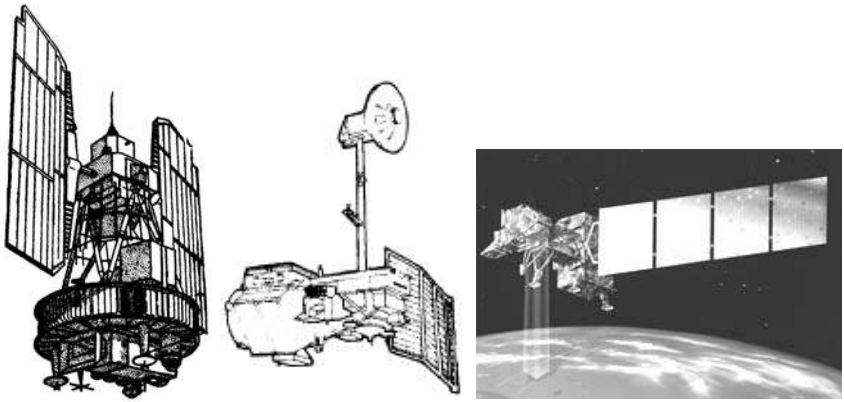
також управління оперативними супутниковими системами, прийом і розподіл супутникової метеорологічної інформації здійснює Європейське космічне агентство (ЄКА). Із запуском цих супутників почалась участь космічного агентства ЄКА в міжнародних експериментах з вивчення погодних явищ WWW (World Weather Watch) в рамках глобальної програми з дослідження атмосфери GARP (Global Atmospheric Research Programme). Пробний запуск першого космічного апарата цієї серії відбувся у листопаді 1977 р. зі Східного ракетного полігону США, подальші запуски відбувалися з полігону Kourou (Французька Гвіана). Серія супутників забезпечує отримання інформації кожних 0,5 год, що дає змогу складати поточні й короткотермінові прогнози погоди на окремі частини доби (ранок, обід, вечір, ніч). Роздільна здатність знімків 2,5 км, ширина смуги знімання – півкуля.

*Ресурсні* супутники або супутники дистанційного зондування Землі застосовують для всестороннього вивчення Землі. Дані ресурсних супутників використовують для цілей народного господарства, вивчення природних ресурсів, а також для вирішення комплексу наукових та комерційних задач. Для цього необхідно, щоб супутникова система забезпечувала постійну чи регульовано-періодичну інформацію про одні і ті ж регіони Землі за однакових умов освітленості. Проте це порівняно невеликі апарати. Раніше вони являли собою циліндровий контейнер заввишки 3,5 м з крилами – панелями сонячних батарей, які служать основним джерелом електрики на борту супутників. Контейнер складався з двох відсіків: верхнього енергоапаратного і нижнього приладового, де розміщена знімальна апаратура. Сучасні ШСЗ являють собою стійку платформу, на якій кріпляться знімальна апаратура, антени, сонячні батареї та ін. пристрої (див. рис. 3.2).

Щоб забезпечити постійне спостереження за Землею з необхідною точністю вимірювань, ресурсні ШСЗ повинні мати високу точність орієнтації і стабілізації власних швидкостей обертання навколо центра маси. Супутник, що вільно летить у космічному просторі, безладно обертається під впливом зовнішніх сил. Для знімання необхідно визначеним способом повернути супутник – орієнтувати його і стабілізувати на час знімання, тобто зберегти правильну орієнтацію. З різних режимів орієнтації для знімання найбільш важлива так звана орбітальна орієнтація, тобто

стабілізована тривісна орієнтація щодо Землі, за якої одна вісь супутника, яка збігається з оптичною віссю знімальної системи, незмінно направлена вниз по місцевій вертикалі до Землі, друга – за заданим курсом, а третя – перпендикулярна площині орбіти. Інформацію про необхідну корекцію для орієнтації супутника отримують від давачів, які видають команду виконавчим органам орієнтації – реактивним соплам та електродвигунам-маховикам. Похибка орієнтації супутника становить близько 1°. При цьому коливання супутника під час польоту є плавними.

Для вивчення природних ресурсів Землі з космосу запущено багато ШСЗ. Одними з перших ресурсні супутники запустили США. У липні 1972 р. полетів перший з таких супутників ERTS (Earth Resources Technological Satellite). На ньому вперше був випробуваний телевізійний спосіб знімання (до того знімали фотокамерами). У січні 1975 р. був запущений другий супутник цієї серії, який перейменований у "Лендсат" ("*Landsat*") з аналогічною апаратурою (рис. 3.3). Зараз "Лендсат-1, 2, 3, 4, 5" вже не діють. "Лендсат-6" не вийшов на розрахункову орбіту і згорів у щільних шарах атмосфери. "Лендсат-7" перебуває на орбіті і передає дані. На цих супутниках, окрім систем орієнтації, стабілізації та енергоживлення, розташовані сканувальні пристрої. На супутниках першого покоління ("Лендсат-1,2,3") був закріплений багатоспектральний сканер MSS (Multi Spectral Scanner), що давав зображення з роздільною здатністю 80 м у чотирьох спектральних каналах. "Лендсат-4,5" були оснащені також сканером TM (Thematic Mapper) роздільної здатності 30 м, що знімає земну поверхню у семи каналах. За півроку роботи камери на "Лендсат-4" з липня 1982 р. по лютий 1983 р., коли супутник зазнав численних несправностей, камерою було передано близько 6 тис. якісних фотографій Землі. Цільовою апаратурою знімання на "Лендсат-7" стає багатоспектральна камера ETM+, що являє собою удосконалений варіант камери ETM (Enhansed Thematic Mapper – удосконалений тематичний картограф), раніше розробленої для супутника "Лендсат-6". Вона має вісім діапазонів знімання і роздільну здатність 15 м. ШСЗ "Лендсат" виведені на сонячно-синхронну орбіту висотою 900 км з кутом нахилу 98,2° до площини екватора. Роблячи 14 обертів на добу, супутник проходить над одними і тими ж точками місцевості через 17–18 діб і забезпечує



*а* *б* *в*

Рис. 3.1.3. Ресурсні супутники "Лендсат-1" (*а*), "Лендсат-4" (*б*) та "Лендсат-7" (*в*).

повторення знімання поверхні через цей період, тобто 20 разів протягом одного року.

Унаслідок космічних знімань були складені фотокарти території США й окремих штатів, а також деяких інших країн, які за запрошенням уряду США взяли участь в обробці даних. Космічні знімки знайшли застосування в багаточисленних галузях геолого-географічних досліджень і господарській діяльності. Багатозональне знімання було ефективним для вивчення забруднення водойм, уражень рослинності, вивчення стану сільськогосподарських культур.

У 1974 р. почала працювати радянська система вивчення природних ресурсів з космосу за допомогою супутників-автоматів "*Метеор–Природа*" (рис. 3.4). Ресурсні супутники "Метеор-Природа" виводились на геліосинхронну субполярну орбіту висотою в одних випадках 900 км і нахилом 82,5°, в інших – 650 км і нахилом 98°. Оснащені були багатозональними телевізійними камерами. Термін роботи одного носія півтора-два роки,

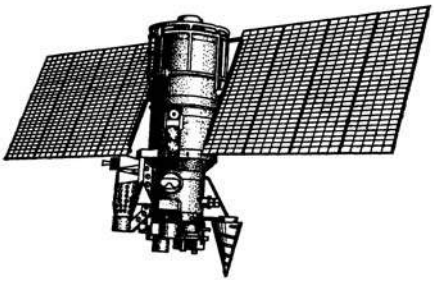


Рис. 3.4. Штучний супутник Землі "Метеор-Природа".

після чого замінювали на інший, забезпечуючи регулярною передачею на Землю багатозональної інформації. Цю інформацію пізніше використовували для цілей народного господарства та наук про Землю. Нею користувалися спеціалісти сільського господарства, лісоводи, геологи, географи, океанологи, гідрологи, екологи та спеціалісти інших галузей. За час експлуатації супутників територія колишнього Радянського Союзу була знята більше 600 разів сенсорами малої і середньої роздільної здатності. Водночас розв'язували задачі, пов'язані з космічною технікою дистанційного знімання.

З 1991 р. на орбіті для вивчення природних ресурсів Росії задіяні супутники серії "*Ресурс*" (рис. 3.5). Окремі прилади дистанційного зондування, методику обробки й інтерпретації інформації, що поступає, а також особливості практичного застосування супутників першого покоління "Ресурс-О1" відпрацьовували на космічних апаратах серії "Метеор-Природа". Головною відмінністю супутників типу "Ресурс-О1" від своїх попередників є змога передачі з борту ШСЗ цифрових зображень, завдяки чому споживачам стали доступні не тільки багатозональні фотографії земної поверхні, а й цифрові знімки на магнітних стрічках. Орбітальний сегмент системи складається з одного космічного апарату, який перебуває в оперативному використанні. Супутник "Ресурс-О" виводить українська ракета-носій "Зеніт" на сонячно-синхронну орбіту висотою 617×660 км з нахилом 97,97°. Маса ШСЗ становить 1 900 кг, з яких 500 кг припадає на корисне навантаження. Розмах панелей сонячної батареї досягає 10 м. Сьогодні інформаційні можливості скануючих систем на базі ШСЗ "Ресурс-О" зіставні з

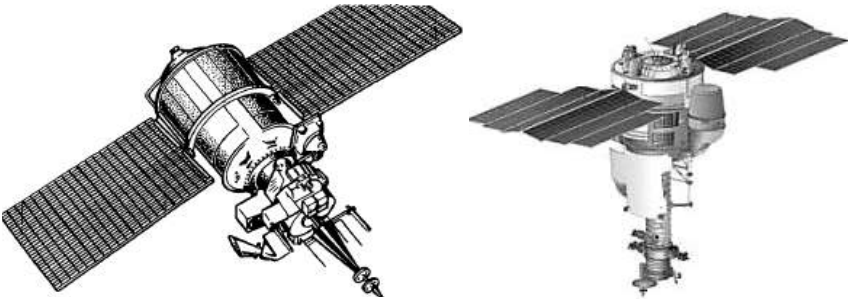


Рис. 3.5. Космічний супутник "Ресурс".

можливостями американської системи “*Лендсат*”. Вони виконують знімання з роздільною здатністю 150 і 35 м.

Відомими ресурсними ШСЗ, зображеннями з якого тривалий час користувались і зараз користуються спеціалісти країн Європи, є серія французьких супутників “*SPOT*” (Systeme Probatoire d’Observation de la Terre). Перший супутник запущений у лютому 1986 р., інші – у 1990, 1993, 1997, 2002 і 2007 роках (рис. 3.6). Інформацію використовують для цілей картографування, землекористування, сільського і лісового господарства, планування містобудівництва, для складання цифрових карт місцевості і контролем за змінами стану природного середовища. Супутник рухається по геліосин-

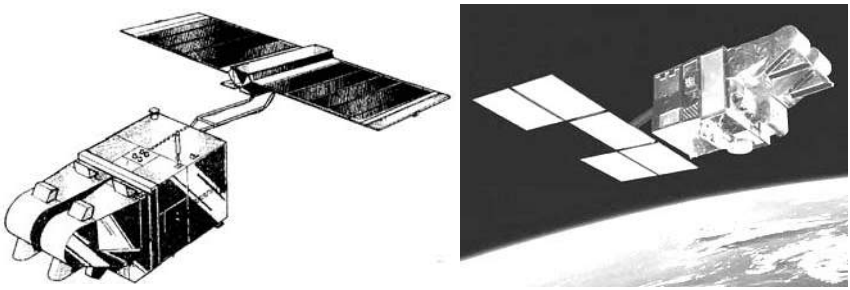


Рис. 3.6. Космічний супутник “SPOT”.

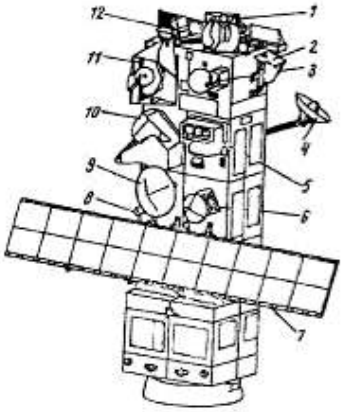
хронній близькоколовій орбіті висотою 824×829 км і нахилом до площини екватора 98,7°. Період обертання “СПОТа” 26 днів. Він робить 369 обертів, у кожен 26 день він знімає одну й ту саму місцевість на поверхні Землі. Виконує знімання у багатоспектральному діапазоні середньої та малої роздільної здатності.

Середньо- і дрібномасштабні дослідження земної поверхні здійснюють з українсько-російського супутника “*Океан-О*”, виведеного у 1999 р. українською ракетою-носієм “Зеніт-2” на субполярну сонячно-синхронну орбіту з нахилом до екваторіальної площини 98°. Орбіта майже колова, висотою 660 км. Період обертання супутника 94 хв. Це супутник важкого класу, його маса в повністю заправленому стані становить 6 360 кг, габарити в розкритому стані на орбіті близько 12×12 м з урахуванням сонячних батарей, діаметр корпусу 2 м, площа панелей сонячних батарей 32 м$^2$. На борту супутника розташований унікальний вимірювальний комплекс з 11 приладів, що доповнюють один одного

своїми інформаційними можливостями. Спочатку передбачали використовувати супутник для досліджень акваторій морів та океанів. Пізніше призначення супутника переглянули з урахуванням сучасних потреб України. Є такі головні напрями використання даних зі супутника: забезпечення потреб сільського господарства України; гідрометеорологічне забезпечення, контроль надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру; пошук корисних копалин та інші геологічні дослідження; моніторинг земельних, водних, лісових, сільськогосподарських ресурсів в інтересах народного господарства і державного управління; екологія і стан навколишнього середовища; океанологічні дослідження, такі як забезпечення рибальства, безпеки судноплавства.

Відомим ресурсним супутником, запущеним за сприяння Європейського космічного агентства у 2002 р., є супутник *"Envisat"* (рис. 3.7). Він забезпечує безперервність спостережень, раніше початих за допомогою супутників серії ERS. "Envisat" став найбільшим космічним апаратом ЄКА для спостережень Землі. На

*а*




*б*

Рис. 3.7. Космічний апарат "Envisat" [22]: *а* – на орбіті, *б* – апаратура ШСЗ: *1* – удосконалений радіометр AATSR, *2* – спектрометр для зондування атмосфери, *3* – мікрохвильовий радіометр MWR, *4* – антена Ka-діапазону, *5* – сканер ScaRab, *6* – антена X-діапазону, *7* – антена радіолокатора зі синтезованою апертурою ASAR, *8* – лазерний відбивач системи точного визначення параметрів орбіти, *9* – антена радіолокаційного висотоміра RA-2, *10* – прилад GOMOS глобального моніторингу озонового шару, *11* – спектрометр MERIS, *12* – інтерферометр Міхельсона MIPAS.

його борту знаходяться 10 складних приладів, які виконують спостереження в оптичному і радіолокаційному діапазонах, що досліджують хімічні процеси в атмосфері. Вони забезпечують також безперервне спостереження та контроль за земною сушею, атмосферою, океанами і льодовими полями. ШСЗ виведений на близьку до кола сонячно-синхронну орбіту заввишки 820 км і нахилом 98,55°. Маса корисного навантаження, включаючи сполучні елементи 2 000 кг. Хоча період повторного прольоту супутника над заданим районом досягає 35 діб, більшість давачів ШСЗ забезпечують повне покриття Землі за 1–2 доби. Знімання високоширотних районів здійснюють ще частіше.

Серед ресурсних супутників світу, які виконують знімання середньої роздільної здатності і передають на приймаючі станції тисячі якісних зображень Землі, слід назвати американські супутники *Terra*, які стартували 1999 р. на сонячно-синхронну орбіту висотою 705 км; серію індійських супутників *IRS* (Indian Remote Sensing satellite system), запущених з радянського полігону Тюратам у 1988 р. (висота орбіти 618 км) та японських супутників *Adeos* (ADvased Earth Observation Satellite), виведених на орбіту за сприяння японського космічного центру NASDA у 1996 р.

Кінець XX – початок XXI ст. характеризує бурхливий розвиток носіїв космічної апаратури, яка призначена для отримання даних великої роздільної здатності – метри і сантиметри на місцевості.

Перший з таких супутників, *IKONOS-2* (США), виведений на орбіту висотою 681 км у вересні 1999 р. (рис. 3.8. *а*). На борту супутника встановлена камера з фокусною відстанню 10 м, розроблена корпорацією Estman Kodak, яка дає змогу отримувати знімки Землі в оптичному і ближньому інфрачервоному діапазонах з просторовою роздільною здатністю 1 м, панхроматичним цифровим сенсором і чотиридіапазонним мультиспектральним сенсором розрізнення 4 м. Замовникам пропонують стандартні зображення розміром 11×11 км.

У грудні 2000 р. з російського космодрому "Свободный" у Сибіру стартував ізраїльський супутник *EROS*-A1, який став другим супутником, який виконує збір інформації про земну кулю з великою роздільною здатністю. Він запущений на геліосинхронну субполярну орбіту висотою 480 км. 250-ти кілограмовий супутник є найлегшим у світі супутником подібного класу. На ньому розташовані сенсори, які проводять знімання поверхні Землі з роздільною здатністю 1,8 м/пікс у панхроматичному режимі.

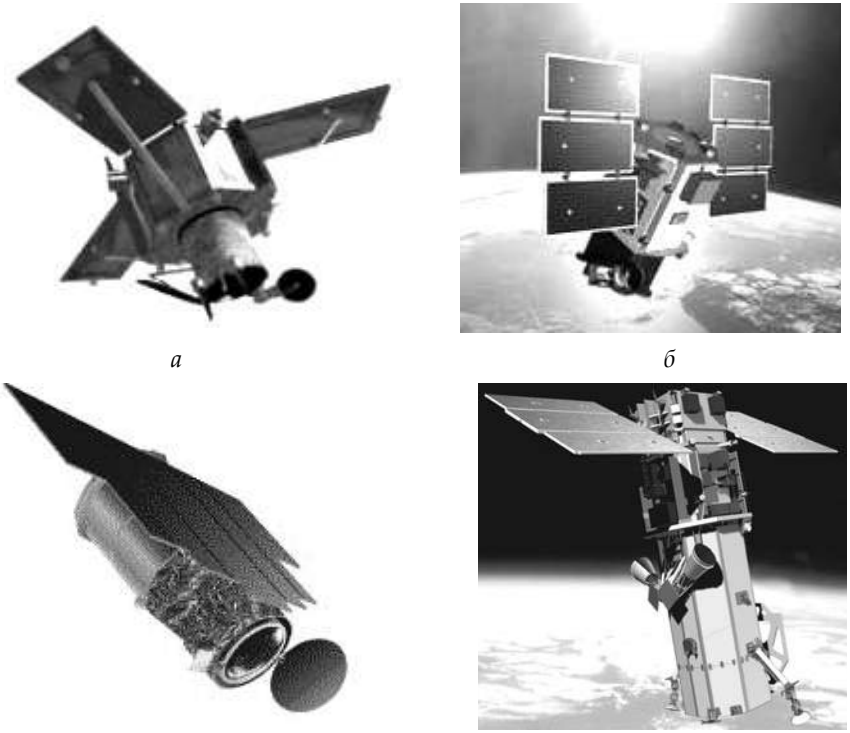



Рис. 3.8. ШСЗ високої роздільної здатності:
*а* – IKONOS, *б* – QuickBird, *в* – OrbView, *г* – WorldView.

Менше ніж за один рік американською корпорацією Digital Globe був успішно реалізований проект запуску супутника з сенсорами субметрової роздільної здатності. Це поклало початок новій ері отримання космічних зображень роздільної здатності в десятки сантиметрів на місцевості. Супутник *QuickBird* (США) виведений на орбіту висотою 450 км у жовтні 2001 р. (рис. 3.8. *б*). Високоякісна оптична система, унікальний блок приймачів, бортовий накопичувач великої ємкості і надзвичайна маневреність дає змогу QuickBird отримувати знімки з просторовою роздільною здатністю 61 см. Знімання проводять панхроматичним (0,61 м) і чотиридіапазонним мультиспектральним сенсором (роздільної здатності 2,44 м) в оптичному і ближньому інфрачервоному діапазонах. Смуга охоплення становить 16,5 км, що дає змогу фік-

сувати стандартне зображення 16,5×16,5 км. Щорічно зніманням охоплюють 75 млн. км$^2$ земної поверхні.

У червні 2003 р. з борту літака-носія, який знаходився над акваторією Тихого океану на висоті близько 11 тисяч метрів здійснений пуск ракети-носія PEGASUS, яка вивела в космос супутник *OrbView*-3 (рис. 3.8. *в*). Супутник вийшов на кругову сонячно-синхронну орбіту висотою 470 км, нахил 97,25 °, період обертання 92,5 хв. OrbView має вигляд циліндра 1,9 м в довжину і приблизно 1,2 м в діаметрі. ШСЗ має одну камеру OrbView High Resolution Imaging System, здатну отримувати панхроматичні знімки з розрізненням 1 м і мультиспектральні знімки роздільної здатності 4 м.

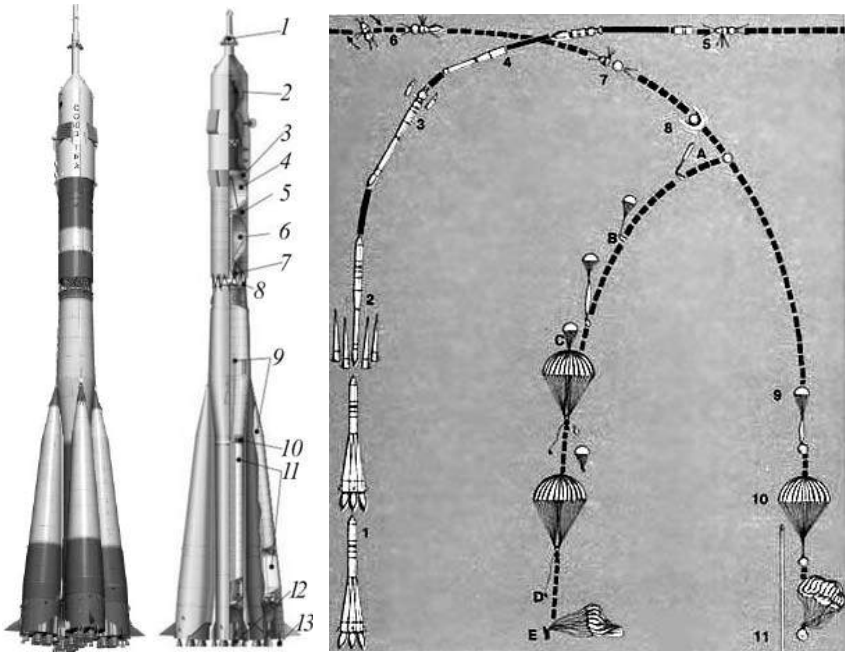
Космічний апарат WorldView запущений 18 вересня 2007 р. (власник – компанія DigitalGlobe (США). Супутник виведений на навколоземну сонячно-синхронну орбіту заввишки 496 км. Відрізняється високим розрізненням (до 0,46 м у панхроматичному і 1,8 м – у мультиспектральних каналах), продуктивністю. Дані, отримані зі супутника, застосовують для оновлення топографічних карт масштабу 1:2 000, створення ЦМР з точністю 1–3 м по висоті та інвентаризації об'єктів у різних галузях господарства.

Великомасштабні дослідження з ресурсних супутників використовують для земельного кадастру території, вартісної оцінки земель, моніторингу забудованих територій, досліджень продуктивності сільськогосподарських угідь, бонітету лісів, для виявлення надзвичайних ситуацій та різних екологічних цілей.

***3.1.2.2. Пілотовані кораблі.*** Космічні кораблі складаються з двох частин. Перша з них – сферичний апарат, призначений для роботи космонавта і спуску його на Землю разом з обладнанням системи життєзабезпечення. Друга частина корабля – це приладовий відсік з гальмівним двигуном та іншим устаткуванням.

Варто зазначити, що на стартовій площадці космодрому перебуває не корабель, а космічний комплекс, який складається з ракети-носія і власне корабля. Космічний корабель займає лише третю частину об'єму космічного комплексу. При цьому забезпечена повна єдність усіх таких комплексів, оскільки єдиним доступним засобом для виведення космічного корабля у космос є ракета. Для того, щоб вона розвинула космічну швидкість (8 км/с), необхідна її кількаступінчаста побудова (2–4 ступені) (рис. 3.9. *а, б*). Корабель "Восток" був виведений на орбіту триступінчатою ракетою-носієм.

Сучасні космічні комплекси суттєво змінюються за час свого польоту від старту до повернення. Політ космічного апарата поділяють на три етапи: виведення, орбітального польоту та етап приземлення (рис. 3.9. *в*). Розглянемо детальніше схему польоту. На етапі виведення, після старту (*1*), апарату надають необхідну космічну швидкість у заданому напрямі. Скидаються бокові (*2*), далі – носові обтікаючі блоки (*3*). Відділяється друга ступінь, третя виводить корабель на орбіту (*4*). Під час орбітального польоту космічний корабель рухається по інерції, за законами небесної механіки. На початку цього етапу відділяється третя ступінь ракети-носія (5), виводячи корабель на розрахункову орбіту. Часто космічні кораблі мають ракетні двигуни на хімічному паливі для маневрування, коректування траєкторії руху чи гальмування під час приземлення. В кінці орбітального польоту, апарат орієнтують для спуску і включають бортові двигуни (*6*). Під час повернення на Землю перед входженням в атмосферу космічний апарат поділяється на кілька частин (орбітальний відсік, апарат, що спускається, кабіна з екіпажем тощо) (*7*). Спуск відбувається з аеродинамічним гальмуванням по балістичній або плануючій траєкторії. По балістичній траєкторії перевантаження досягають 8–10 разів, тоді як по плануючій на апарат, що спускається, окрім сили опору, діє і підйомна сила, яка дозволяє зменшити ці перевантаження в 1,5–2 рази. На ділянці спуску в густих шарах атмосфери має місце інтенсивний аеродинамічний нагрів апарату (*8*). В кінці траєкторії спуску, на висотах в декілька кілометрів, швидкість руху знижується до 150–250 м/сек. Подальше зниження швидкості перед приземленням здійснюється зазвичай за допомогою парашутної системи. На висоті 4 км випускається витяжний парашут (*9*), далі розкривається основний (*10*). Апарат приземляється (*11*). Під час перших космічних польотів на кораблях "Восток" космонавти приземлялися на парашутах. На висоті 7 км у герметичній кабіні відкидався вхідний люк і космонавт катапультувався в кріслі (*A*). На висоті 4 км космонавт позбувався крісла (*B*), відкривався його парашут (*C*), космонавт продовжував спуск (*D*) і приземлявся (*E*). Сьогодні космонавти приземляються у спусковому апараті – невеликої форми кулястій кабіні, швидкість якої біля поверхні землі доводять до нуля. В американських астронавтів спускові апарати приводнювались.




*а* *б* *в*

Рис. 3.9. Зовнішній вигляд космічного корабля із ракетоносієм (*а*); розріз космічного апарата (*б*): *1* – система аварійного рятування, *2* – космічний корабель, *3* – перехідний відсік, *4* – паливний бак із керосином, *5* – відсік системи управління і вимірювань, *6* – бак окислювача з киснем, *7* – маршевий двигун, *8* – перехідна ферма, *9* – бак окислювача з киснем, *10* – міжбаковий відсік, *11* – паливний бак з керосином, *12* – маршеві двигуни, *13* – рульові двигуни; *в*) старт, політ і приземлення КА (пояснення в тексті).

Кораблі “Восток”, “Меркурій” були слабо пристосовані для знімання, хоча вже тут, біля ілюмінатора, встановлювали спеціальні кронштейни для кріплення фотоапаратури. Кабіна перших космічних кораблів хоч і була просторішою за звичайну кабіну льотчика на літаку, проте порівняно з подальшими апаратами, маломісною. В апараті є три ілюмінатори з жароміцними склами і два люки, які швидко відкриваються. Біля ілюмінатора крісло космонавта встановлене так, щоб на ділянках виведення і спуску корабля перевантаження діяли на космонавта в найбільш

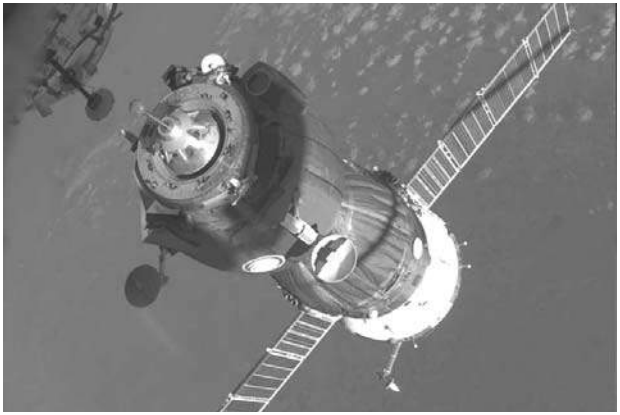


Рис. 3.10. Загальний вигляд космічного корабля "Союз".

сприятливому напрямі (груди – спина). Якби навіть з якої-небудь причини герметизація кабіни була порушена, життя космонавтові зберіг би скафандр з автономною системою життєзабезпечення. Крісло могло катапультуватися разом з космонавтом, і в нім розташовували парашутні системи, які забезпечували м'яке приземлення космонавта. М'яка посадка могла бути здійснена і в кабіні корабля.

Космонавт міг сам уручну управляти польотом космічного корабля. На кораблі була ручка, за допомогою якої можна було і задати кораблю будь-яку орієнтацію. Поруч з нею розташовані радіоприймач і контейнери з їжею. У кораблях наступної серії "Восход" космонавти перебували вже без скафандрів і "житловий" відсік корабля був дещо розширений.

Перші "будинки на орбіті" змінили інші, більш пристосовані для роботи і проживання апарати. Це були апарати серії "Союз", які складалися з двох відсіків – кабіни космонавтів та орбітального (рис. 3.10). Усередині кабіни розміщені крісла космонавтів, радіоапаратура, системи життєзабезпечення й апаратура для активного управління польотом. Як і на кораблі "Восток", кабіна космонавтів мала три ілюмінатори, через які велися спостереження під час польоту.

Користуючись спеціальним люком у верхній частині кабіни, можна перейти в орбітальний відсік корабля. Цей відсік схожий формою на кабіну корабля "Восход". Призначення ж його інше.

Орбітальний відсік – це лабораторія, в якій проводять наукові дослідження, їдять, відпочивають, займаються фізкультурою. В орбітальному відсіку чотири ілюмінатори. Через них ведуться спостереження і кінознімання. У цьому відсіку також є радіоапаратура, системи життєзабезпечення, сервант для харчових продуктів.

Якщо космонавтам треба вийти в космос, орбітальний відсік використовують як шлюз – в нім є зовнішній люк, який відкривається автоматично і вручну. Загальний об'єм двох приміщень – кабіни й орбітального відсіку – близько 9 м$^3$.

Над орбітальним відсіком розташований стикувальний вузол, а під кабіною – приладо-агрегатний відсік, де зосереджені рухові установки корабля і різна техніка, яка забезпечує космонавтам комфорт: агрегати системи терморегулювання, енергоживлення, апаратура радіозв'язку, прилади для управління кораблем, а також бортові комп'ютери.

Зовні на приладо-агрегатному відсіку, окрім антен, закріплені панелі сонячних батарей, що нагадують крила. Від цих батарей, які мають площу 14 м$^2$, заряджають бортові хімічні електробатареї, що забезпечують весь корабель електроенергією.

Космічний корабель "Союз-22" був спеціально модифікований для виконання космічного фотографічного знімання. У приладо-агрегатному відсіку разом із двигунами апарата і пультом управління, розміщали контейнери для повернення плівки. В орбітальному відсіку корабля "Союз-22" замість стикувального вузла додатково встановлювали фотовідсік діаметром 1,3 м. Усередині фотовідсіку над ілюмінатором розміщували багатозональну фотографічну камеру МКФ-6. Цією камерою проводили знімання земної кулі у різних зонах електромагнітного спектра.

Усі пілотовані космічні кораблі "Восток", "Восход", "Союз" (СРСР), "Меркурій", "Джеміні", "Аполлон" (США), "Шеньчжоу" (Китай) використовували як для досліджень на їхньому борту, так і для фотографування Землі. З космічних кораблів малоформатними камерами були отримані тисячі кольорових і чорно-білих фотографічних, а пізніше телевізійних знімків земної поверхні.

***3.1.2.3. Орбітальні станції.*** Значно більші можливості для розміщення й енергоживлення знімальної апаратури, роботи

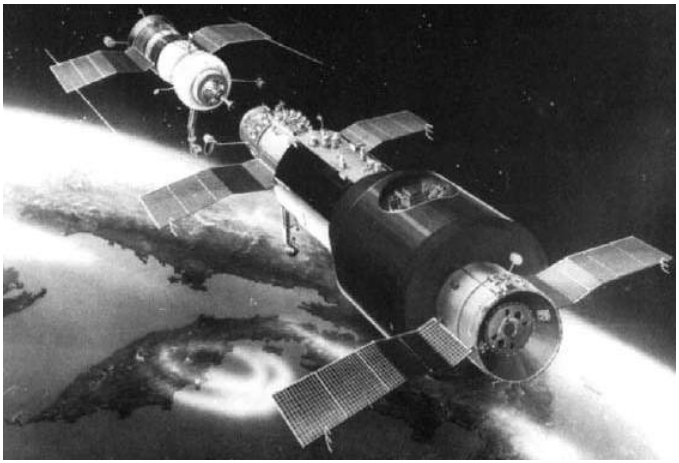


Рис. 3.11. Орбітальна станція "Салют-1" перед стикуванням із кораблем "Союз" [120].

змінних екіпажів та їхніх наукових досліджень мали орбітальні станції.

Орбітальні науково-дослідні станції в пілотованому режимі охоплювали власне станцію і зістиковані кораблі. Станція "*Салют*" була розділена на три відсіки (рис. 3.11). Найвужчий з них – перехідний. Довжина цього циліндра 3 м, діаметр 2 м. До його складу належав стикувальний вузол, через який космонавти і вантажі потрапляли з корабля на станцію. Перехідний відсік – це і житлове приміщення. Він герметичний, в ньому розміщені наукова апаратура, системи життєзабезпечення і терморегулювання. Тут розміщений і пункт управління станції, а зовні перехідного відсіку прикріплені сонячні батареї, антени, телекамера та різні давачі. У відсіку "Салюту-1" була встановлена астрономічна обсерваторія "Оріон", яка містила дзеркальний телескоп діаметром 28 см, спектрографи та інші прилади. Шість ілюмінаторів відсіку давали змогу вести спостереження Землі і космосу.

Через спеціальний люк з перехідного відсіку можна було перейти в робочий. Це було найбільше з приміщень станції. Робочий відсік складався з двох циліндрів діаметрами в 2,9 м і 4,2 м, сполучених усіченим конусом при загальній довжині в 9,1 м. Тут розміщували прилади, які забезпечували комфорт космонавтам. Звідси, так само як і з перехідного відсіку, можна управляти стан-

цією та окремими її пристроями. Крізь будь-який з п'ятнадцяти ілюмінаторів було видно все те, що відбувається поза станцією.

У космосі люди стикаються з таким явищем, як невагомість. Вона наступає після виведення корабля на орбіту і після виключення двигунів. З погляду фізики це стан, під час якого усередині космічного корабля всі фізичні тіла не мають точки опори. Людина рухається в невагомості не в одній площині, як на землі, а в просторі. До цього треба було звикати, змінювати принципи побудови руху відповідно до невагомості. У невагомості відбувається зміна циркуляції крові в організмі людини. У космічному польоті змінюється склад крові людини, втрачається кальцій з кісток, відбуваються інші зміни.

Щоб зменшити неприємні відчуття, був розроблений незвичайний костюм "Чайка", завдяки якому космонавти боролися з невагомістю. Як відомо, на Землі серце підганяє кров до голови, а вниз вона опускається завдяки силі тяжіння. В умовах невагомості земного тяжіння немає і відбувається активна циркуляція крові до голови, що викликає вельми неприємні відчуття. Костюм "Чайка" має зібрані в гармошку штани і щільно прилеглий до тіла пояс. Спеціальний компресор викачує повітря з штанів і створює усередині знижений тиск, що змушує кров циркулювати від голови до нижньої частини тіла.

Конструктори станції зробили все, щоб обстановка на станції нагадувала земну. Наприклад, на "Салюті-3" умовна підлога була темною і покрита ворсовою доріжкою, умовну стелю побілили, а стінам додали проміжні тони.

На станції була "доріжка, що біжить" – нескінченна стрічка на двох циліндрах, які обертаються. Це один з тренажерів, на яких тренували свої м'язи мешканці станції. Був тут і велотренажер, або велоергометр, крутячи педалі якого космонавт відчував таке ж навантаження, як під час велопробігу. Без подібних пристроїв неможливий жоден довготривалий космічний політ. Так буде до тих пір, поки на орбітальних станціях не створять штучну вагу. Поки ж доводиться удаватися до різних хитрощів. Щоб "бігти по доріжці", космонавт за допомогою спеціальних ременів заздалегідь притискав себе до цієї доріжки з силою, яка дорівнює приблизно 60% його ваги. У костюмах космонавтів також вшиті пристрої, які тренують м'язи. Все це необхідно для підтримання їхнього тонусу.

Під час сну космонавти в спальних місцях закріплювали себе в потрібному положенні. Зокрема, спальне місце Леоніда Каденюка було прикріплене до стіни.

За робочим відсіком орбітальної станції знаходився агрегатний відсік. Оскільки він призначений для розміщення паливних баків і бортових двигунів, то потреби в герметизації немає. Зовнішню поверхню цього відсіку, як і інших, використовували для установки сонячних батарей, антен, телекамер і різних наукових приладів.

Подібно до того, як від марки до марки удосконалюють автомобілі, з кожним запуском станцій серії "Салют" їхнє обладнання теж ставало досконалішим. Дещо змінювався і їхній зовнішній вигляд.

Зокрема, на "Салюті-3" були встановлені рухомі панелі сонячних батарей. Яке б положення в просторі не займала станція, спеціальний механізм постійно орієнтував панелі так, щоб сонячні промені падали на них перпендикулярно. Під час такого положення панелей батареї дають найбільш потужний струм, що забезпечує якнайкраще енергопостачання станції.

На "Салюті-4" використовували установку, яка перетворювала відходи життєдіяльності екіпажа на чисту воду. Вдалося, хоч і частково, організувати на станції замкнутий кругообіг води – перший крок у здійсненні в "ефірних поселеннях" повністю замкнутих екологічних циклів. На цій станції успішно працювали дві шлюзові камери для відходів. За допомогою спеціальних пристроїв "вистрілювали" контейнери зі сміттям, які згорали в атмосфері. Одним з важливих удосконалень на "Салюті-4" була автономна система навігації. За її допомогою космонавти отримували всі відомості про орбіту станції і її положення в просторі в момент польоту.

Роль обчислювальної техніки на станціях "Салют" була дуже велика. Зокрема, наприклад, на "Салюті-5" працювала електронно-обчислювальна машина, що керувала роботою всіх приладів станції без участі екіпажа. Зазначимо, що всі станції серії "Салют" могли працювати як у пілотованому, так і в автоматичному режимі.

У 1977 р. на орбіті почала функціонувати радянська станція другого покоління "Салют-6". Регулярний транспортний зв'язок з орбітальною станцією почали підтримувати автоматичні ван-

тажні кораблі "Прогрес". Цікаві деякі деталі. За центральним постом управління "Салют-6" розташовано їдальню. Дві відкидні кришки утворювали обідній стіл, поряд – підігрівачі для їжі, а до столу підведена гаряча і холодна вода. Для фізичних вправ функціонували "доріжка, що біжить", і велоергометр, який закріплювався на "стелі". Нововведенням була лазня. На "Салюті-6" був встановлений відеомагнітофон, на якому можна у вільну хвилину подивитися цікаві кінофільми, а також телевізор, який давав змогу вперше бачити прямі передачі із Землі.

Два стикувальні вузли "Салюту-6" – важливі деталі конструкції. Якщо, наприклад, виявиться несправним один стикувальний вузол, можна було скористатися іншим. У випадку, скажімо, пробою метеором корабля "Союз", пристикованого до станції, для повернення космонавтів на Землю можна послати до "Салюту" інший "Союз", оскільки "Салют-6" може приймати два кораблі одночасно.

Протягом майже дворічного польоту станції в пілотованому режимі п'ять основних й 11 екіпажів-відвідувачів вели на ній різносторонні дослідження і візуальні спостереження, отримали десятки тисяч знімків земної поверхні, які передали фахівцям СРСР і країн-членам Ради економічної взаємодопомоги. Безпрецедентний за тривалістю політ станції "Салют-6" відкрив перспективу створення постійних орбітальних науково-дослідних комплексів, що діяли, зі змінюваними екіпажами.

У 1973–1974 рр. на орбіті працювала американська станція "*Скайлеб*". Як було зазначено, вона складалась із двох відсіків – побутового і лабораторного. Перший мав чотири приміщення. Одне з них – спальня з трьох кабін (за кількістю астронавтів). Кімната відпочинку одночасно служила і їдальнею. Поруч – невелика бібліотека і магнітофон. "Спортзал" станції мав площу близько 17 м$^2$. У спортивному відділенні розташовані численні медичні прилади для контролю стану здоров'я астронавтів. У значно більшому лабораторному відсіку проводили різні наукові експерименти з пристосування організмів та рослин до умов космічного простору та вели спостереження за космічним простором і поверхнею Землі.

Основна циліндрова частина станції "Скайлеб" переходила в шлюзову камеру, яка мала форму зрізаного конуса, і стикувальний вузол – циліндр значно меншого діаметра, ніж основний блок

станції. У шлюзовій камері розміщені системи життєзабезпечення станції, але призначені вони, головно, для переходу в причальну конструкцію і виходу астронавтів у відкритий космос. У камері декілька ілюмінаторів і три люки. Один з них веде в космос, інший – в основний блок, третій – в причальну конструкцію, яка має два стикувальні вузли: один на торці, а інший, запасний, на бічній стінці. Через стикувальні вузли приєднувалися космічні кораблі серії "Аполон".

Із запуском у 1981 р. кораблів багаторазового використання "*Спейс шатл*" дослідження та знімання земної поверхні з космосу почали проводити якісно новими методами. Космічний човник розрахований на порівняно короткі (декілька тижнів) польоти по навколоземній орбіті. Результати досліджень швидко доставляли на Землю.

Важливим для знімання був політ шатла "Колумбія" у 1983 р. У його вантажному відсіку довжиною 18 м зі стелею, що розкривається, була розміщена лабораторія "Спейслеб", яку створили європейські країни. У лабораторії працювали чотири фахівці, що обслуговували науково-дослідну апаратуру для знімання і вивчення Землі.

Ефективність знімання з пілотованих кораблів і станцій суттєво більша, ніж зі ШСЗ. Космонавти виконують знімання більш цілеспрямовано, вибираючи сприятливі зовнішні умови. Значною є можливість ремонту знімальної апаратури.

Унікальну інформацію, об'єм якої збільшується впродовж тривалих польотів, отримують при візуальних спостереженнях. Космонавти відзначають високу інформативність візуальних космічних спостережень, яку не можна пов'язати зі звичайною роздільною здатністю людського зору, що оцінюють в середньому приблизно в декілька десятків кутових секунд. Здавалося б, що при такій роздільній здатності з висоти 300 км можна було виявляти об'єкти розміром тільки близько сотні метрів. Проте багато радянських й американських космонавтів виразно бачать з борту пілотованих кораблів і орбітальних станцій значно менші за розмірами предмети. З космосу добре видно системи доріг, інверсійні сліди літаків тощо. Можливість спостереження протяжних об'єктів пояснюють відомим фактом, що виділяюча здатність зорової системи в цьому випадку значно вища від її роздільної

здатності, яку оцінюють за предметами ізометричної форми. Водночас є свідчення космонавтів про спостереження невеликих будинків, рухомих вантажівок на шосе і т.п.

Як показав досвід роботи на станції "Салют-6", для візуальних спостережень доцільна орієнтація станцій поздовжньою віссю в напрямі місцевої вертикалі. Якщо в цьому положенні додати станції обертання з кутовою швидкістю, яка дорівнює швидкості її орбітального обертання навколо Землі, то без витрати палива завдяки гравітаційній стабілізації можна забезпечити практично постійний навколоземний огляд. Ці принципи було використано на новіших орбітальних станціях, що мають значно більшу кількість відсіків, які можна було окремо за допомогою ракет-носіїв виводити в космос. Такі відсіки різного призначення називають модулями, а самі постійно діючі станції з десятками модулів – *орбітальними комплексами*.

Відомим орбітальним комплексом була станція "*Мир*". Основним модулем у складі орбітальної станції, з якого виконувалось знімання і вивчення поверхні Землі був, модуль дистанційного зондування Землі "*Природа*". Модуль був космічною платформою, оснащеною різноманітною апаратурою для знімання земної поверхні. Стикування "Природи" до орбітального комплексу здійснили в квітні 1996 р., тобто через десять років після виводу на орбіту самої станції. Унаслідок цього термін служби модуля "Природа" значною мірою обмежився станом орбітальної станції, експлуатація якої завершилась у 1999 р. Модуль "Природа" (рис. 3.12) призначений для проведення експериментальних досліджень з метою відробітку комплексних методів дистанційного зондування з використанням багатоспектральних засобів спостереження, а також для отримання інформації ДЗЗ, необхідної під час вирішення глобальних і регіональних завдань кліматології, океанографії та екології.

Довжина модуля досягала 13 м, максимальний діаметр – 4,35 м, маса на орбіті становила 19,7 т, з яких близько 2 т припадало на апаратуру дистанційного зондування.

Давачі дистанційного зондування, розміщені на модулі "Природа", давали змогу проводити знімання майже у всіх діапазонах спектра, охоплюючи ультрафіолетовий, видимий, інфрачервоний і мікрохвильовий діапазони, зокрема спостереження забезпечу-

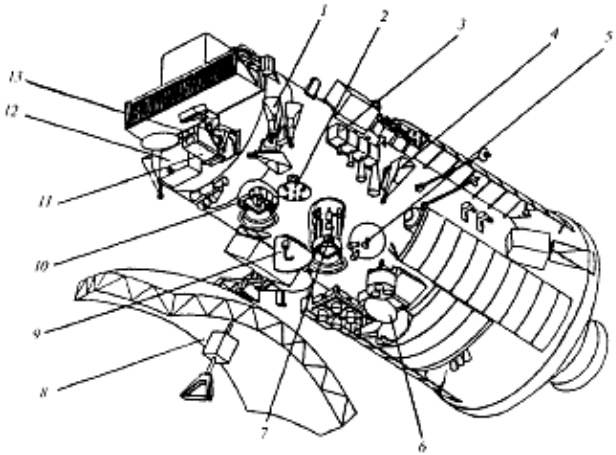



Рис. 3.12. Модуль дистанційного зондування Землі "Природа" у складі орбітального комплексу "Мир"
Умовні позначення до рис. *1* — радіометр РП-600 зі складу комплексу "ІКАР-П"; *2* — системи збору інформації з платформ геофізичного моніторингу "Центавр"; *3* — радіометричний комплекс "ІКАР-Н"; *4* — радіометр РП-600 у складі комплексу "ІКАР-П"; 5 — радіометр РП-225 зі складу комплексу "ІКАР-П"; *6* — система "Дельта" з трьома мікрохвильовими радіометрами; 7 — лідар АЛІССА для вивчення хмарності та аерозолів; *8* — радіолокатор "Траверс"; *9* — радіометр Р-400 зі складу комплексу "Ікар-Дельта"; *10* — спектрометр MOS; *11* — спектрорадіометр "Істок-1"; *12* — місце встановлення камер МСУ-Э2 і МСУ-СК; *13* — ТВ-камера.

валося як в пасивному режимі, так і за допомогою активної системи радіолокації. Оптико-електронна апаратура дистанційного знімання містила спектрорадіометр, два скануючі пристрої, спектрометр, телевізійну камеру, радіолокаційну апаратуру та інші зондуючі системи.

Про масштабність космічних знімань з даного модуля засвідчують деякі характеристики давачів. Зокрема, спектрорадіометр "Істок-1" забезпечував знімання Землі у 64 спектральних каналах. Багатоспектральний скануючий пристрій МСУ-Э2 мав збільшену просторову роздільну здатність до 10 м в надирі. Телекамерою, призначеною для знімання хмарності у видимому діапазоні, отримували зображення роздільної здатності 380 м при висоті орбіти близько 400 км. Багатоспектральна камера MOMS-2P (Modular

Optoelectronic Multispectral Scaner) забезпечувала стереозображення об'єктів. Попередній зразок камери MOMS-2P був встановлений на лабораторному модулі "Спейслеб". Переваги розміщення камери типу MOMS-2P на російському модулі "Природа" були такі: висока (більше 1 року) тривалість проведення спостережень, можливість комплексного використання камери у поєднанні з іншими засобами знімання, розміщеними на модулі, а також вигідніші умови спостереження, пов'язані з тим, що із станції "Мир", яка перебувала на орбіті з нахилом 51,6°, забезпечувалося проглядання більшої ділянки поверхні Землі, ніж з орбітального ступеня "Спейс шатл", що виводиться зазвичай на орбіту з нахилом 28,5°. У камері МОМЗ-2Р передбачено сім каналів отримання зображення з роздільною здатністю 18 м для оптимального розпізнавання типу підстилаючої поверхні. Проте найбільшою перевагою був стереоскопічний режим знімання у двох спектрозональних каналах і каналах отримання стереозображень, який забезпечував побудову цифрових моделей місцевості з елементами аналізу типів використання земель.

Орбітальний комплекс, який сьогодні функціонує у навколоземному просторі – це Міжнародна космічна станція. В її складі функціонують і передбачають доставити такі модулі та елементи (рис. 3.13):

• *"Заря"* – російський функціонально-вантажний модуль, перший з доставлених на орбіту модулів МКС. Обладнаний реактивними двигунами для коректування орбіти станції і великими сонячними батареями. Американський фінансовий внесок в створення "Заря" складає близько 250 млн. дол., російський понад 150 млн. дол.

• *П. О.* – протиосколкова панель або протимікрометеорний захист, який за наполяганням американської сторони змонтований на модулі "Звезда".

• *"Звезда"* – російський службовий модуль, в якому розташовуються системи управління польотом, системи життєзабезпечення, енергетичний та інформаційний центр, а також каюти для космонавтів. Модуль розділений на п'ять відсіків і має чотири стикувальні вузли. Всі його системи і блоки російські, за винятком бортового обчислювального комплексу, створеного за участю європейських і американських фахівців.

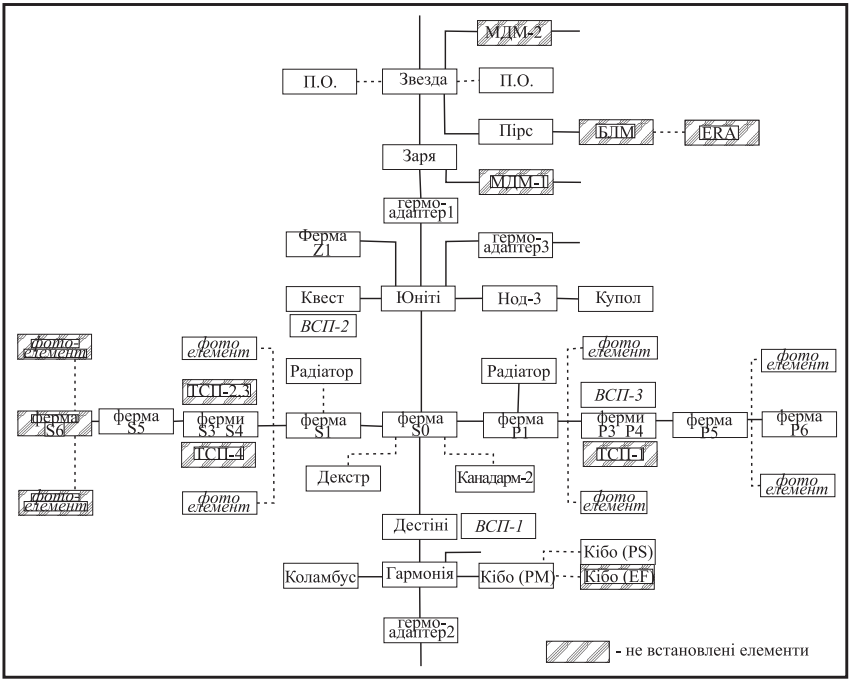



Рис. 3.13. Схема Міжнародної космічної станції (планована по закінченні збірки) [129].

• *МДМ* – малі дослідницькі модулі (плановані): два російські вантажні модулі, призначені для зберігання устаткування необхідного для проведення наукових експериментів;

• *БЛМ* – російський багатофункціональний лабораторний модуль (планований). В ньому передбачені умови для зберігання наукового устаткування, проведення наукових експериментів, тимчасового мешкання екіпажа. Також забезпечує функціональність європейського маніпулятора;

• *ERA* – європейський дистанційний маніпулятор (планований), призначений для переміщення устаткування, розташованого поза станцією. Буде закріплений на російській науковій лабораторії;

• *Гермоадаптер* – герметичний стикувальний перехідник, призначений для з'єднання між собою модулів МКС і для забезпечення стикування шатлів;

• *Нод-3* – модуль МКС, що виконує функції життєзабезпечення астронавтів. Містить системи з переробки води, регенерації повітря, утилізації відходів та ін. З'єднаний з модулем "Юніті";

• *"Юніті"* – американський сполучний модуль, перший з трьох, який виконує роль стикувального вузла і комутатора електроенергії для модулів "Квест", "Нод-3", ферми Z1. До нього через Гермоадаптер-3 стикуються транспортні кораблі;

• *"Пірс"* – порт причалювання, призначений для виконання стикувань російських "Прогресів" і "Союзів". Встановлений на модулі "Зірка";

• *ЗСП* – зовнішні складські платформи: три зовнішні негерметичні платформи, призначені виключно для зберігання вантажів і устаткування;

• *Ферми* – об'єднана фермова структура, на елементах якої встановлені сонячні батареї, панелі радіаторів та дистанційні маніпулятори. Також призначена для негерметичного зберігання вантажів і різного устаткування;

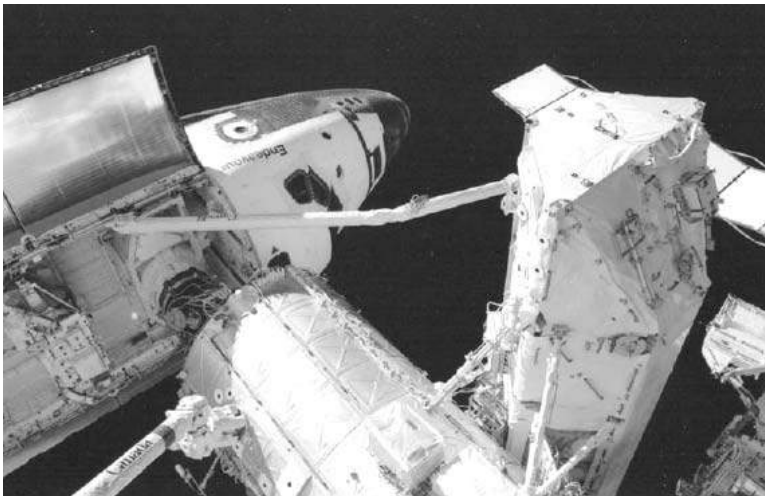
• *"Канадарм"*, або "Мобільна обслуговуюча система" – канадська система дистанційних маніпуляторів, служить головним інструментом для розвантаження транспортних кораблів і переміщення зовнішнього устаткування;

• *"Декстр"* – канадська система з двох дистанційних маніпуляторів, служить для переміщення устаткування, розташованого поза станцією;

• *"Квест"* – спеціалізований шлюзовий модуль, призначений для виконання виходів космонавтів та астронавтів у відкритий космос, з можливістю попереднього проведення десатурації (вимивання азоту з крові людини);

• *"Гармонія"* – американський сполучний модуль, який виконує роль стикувального вузла і комутатора електроенергії для трьох наукових лабораторій. Через Гермоадаптер-2 до нього стикуються транспортні кораблі. Містить додаткові системи життєзабезпечення. Введений в дію 2007 р.;

• *"Коламбус"* – європейський лабораторний модуль, в якому крім наукового устаткування, встановлені мережеві комутатори (хаби), що забезпечують зв'язок між комп'ютерним устаткуванням станції. Пристикований до модуля "Гармонія". Запущений на орбіту 2008 р.;



*а*

*б*

Рис. 3.14. Лабораторія "Дестіні" [117]:
*а* – вигляд ззовні (справа) разом із пристикованим шатлом "Індевор";
*б* – вигляд всередині, де працюють американський астронавт Ед Лу та російський космонавт Ю. Маленченко.

• *"Дестіні"* – американський лабораторний модуль, зістикований з модулем "Гармонія" (рис. 3.14);

• "*Кібо*" – японський лабораторний модуль, який складається з трьох відсіків і одного основного дистанційного маніпулятора. Найбільший модуль станції. Призначений для проведення фізичних, біологічних, біотехнологічних та ін. наукових експериментів в герметичних і негерметичних умовах. Крім того, завдяки особливій конструкції, дозволяє проводити незаплановані експерименти. Пристикований до модуля "Гармонія". Введений в дію у 2008 р.;

• "*Купол*" – прозорий оглядовий купол. Місце для відпочинку, в якому члени екіпажа можуть спостерігати за космосом і Землею, а також пульт управління дистанційним маніпулятором. Встановлений на вузловий модуль НОД-3;

• *ТСП* – чотири негерметичні транспортно-складські платформи (плановані), мають бути закріплені на фермах 3 і 4. Вони призначені для розміщення устаткування, необхідного для проведення наукових експериментів у вакуумі. Забезпечують обробку і передачу результатів експериментів по високошвидкісних каналах на станцію.

На деяких з модулів станції можна віртуально побувати в реальному часі, використовуючи інтернет-сайт www.spaceflights.ru. Зазначимо, що Україна теж приєдналася до спорудження МКС – вона розробила і ввела в експлуатацію систему керування "Курс" космічними апаратами "Компарус". Апаратура радіоуправління, яка являє собою чотирьохконтейнерний варіант, два з яких – наші, а два контейнери – російські, зараз відмінно діє в службових модулях МКС "Заря" і "Звезда" безпосередньо на орбіті.

Отже, розглянуті носії космічної апаратури знімання, які сьогодні обертаються навколо Землі, призначені для виконання різних задач: забезпечують оперативну передачу інформації радіоканалами під час знімання обширних територій – космічні апарати типу "NOAA", "Метеосат"; призначені для детального фотографічного і сканерного знімання; довготривалих досліджень – апарати типу "Океан-О", "Ресурс", "Лендсат", "СПОТ", а також ті, що проводять експериментальні і дослідно-виробничі знімання та візуальні спостереження – орбітальні станції типу МКС.

## 3.2. Орбіти космічних носіїв знімальної апаратури

### *3.2.1. Загальні поняття про орбіти*

Параметри орбіт носіїв знімальної апаратури важливо знати через те, що вони залишаються майже (для певного періоду часу) незмінними, на відміну від авіаносіїв, які можуть у будь-який час змінювати свій маршрут. Деякі параметри орбіти публікуються вже під час запуску супутників і за поданими параметрами орбіти можна визначити можливості використання цього сателіта, зокрема, види матеріалів ДЗЗ, якщо він укомплектований певною знімальною апаратурою.

Супутник, який вже літає на орбіті, в першому приближенні можна вважати аналогічним тілу, що рухається за інерцією, на яке діє відцентрова сила, набута під час виведення його на орбіту ракетними двигунами, та гравітаційна сила Землі, а тому без додаткового включення коректувальних ракетних двигунів супутник не може змінити свою орбіту вверх чи вбік від завданого напрямку, але може піддаватися притяганню Землі і повільно знижувати свою орбіту. У разі досягнення небажаних параметрів зниження з метою продовження терміну роботи супутника його потрібно перевести на розрахункову чи вищу орбіту, якщо такі технічні можливості в ньому конструктивно закладені.

Параметри орбіти залежать від параметрів пускового комплексу, конструкції ракети, точності (стосовно розрахунків) роботи її двигунів, роботи коректувальних двигунів, погодної ситуації в місці старту, стану атмосфери та багатьох інших чинників.

Виведення супутника на орбіту виконують ракети належної потужності, якої вистарчає на здійснення старту (відриву від Землі та виходу з стартового комплексу), виконання розгону і набуття космічної швидкості, досягнення завданої висоти, нахилу, "вписування" та "лягання" в розрахункову орбіту. Корекційні двигуни виконують стабілізацію орієнтації супутника стосовно Землі. Електродвигуни забезпечують розкриття антен зв'язку, панелей сонячного електроживлення, підключення і тестування бортової апаратури і після цього – запуск робочої програми.

Використання супутників для ДЗЗ передбачає знання закономірностей його руху.

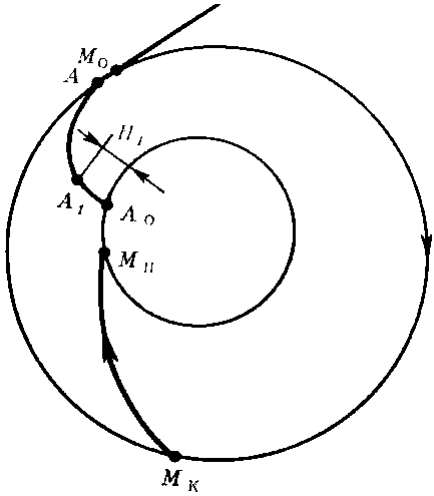



Рис. 3.15. Схема траєкторії космічного польоту.

Шлях, який описує в просторі супутник, називаємо *траєкторією.* Цю траєкторію прийнято ділити на кілька характерних відрізків (рис. 3.15): 1) ділянка виведення на орбіту ($A_0$ – $M_0$), ділянка орбітального польоту ($M_0$ – Мк – $M_0$), ділянка гальмування, входження в атмосферу, зниження і посадки (Мк – Мп).

На ділянці виведення на орбіту супутник повинен бути виведеним в точку простору із завданими небесними координатами, досягнути потрібної швидкості, завданого кута нахилу до горизонту і до меридіану. Саме ці параметри є визначальними для орбітального польоту. Цю першу ділянку, на якій працюють двигуни ракети, називають активною. Оскільки зі стартового комплексу ракета стартує вертикально (рис. 3.16), то після проходження найбільш щільної частини атмосфери повинен початися так званий “поворот по тангажу” – вивід ракети на балістичну[1] траєкторію. На висоті $H_1$ відбувається відокремлення першого ступеня ракети (пункт $A_1$). Це відокремлення планують виконати ще на такій висоті, де густина атмосфери дає змогу використати аеродинамічні площини ракети – носія для її стабілізації після відокремлення першого ступеня[2] та для повороту – виходу на навколоземну траєкторію польоту. Після закінчення роботи другого ступеня ракети відбувається політ по балістичній траєкторії до її найвищого пункту (пункт А, де включається третій ступінь ракети, яка розганяє супутник до швидкості, необхідної для виконання орбітального польоту) з розрахунковими параметрами.

---

[1] Балістична траєкторія – траса польоту, по якій ракета може облітати (огинати) Землю не менше одного повного кола. Ballista – лат. Ядро (куля).

[2] При відокремленні (відстрілюванні) ступеня можуть виникати зміни в плавності польоту.

Тривалість розгону мусить бути розрахована так, щоб пункт А став *перигеєм* (найнижчим пунктом орбіти), а пункт *апогею* (найдальший від Землі пункт орбіти) був у межах інтенсивного притягання Землі. У разі недотримання цієї умови ракета з апаратурою (чи космонавтами) може полетіти в міжпланетний простір, далекий космос.

Рис. 3.16. Старт ракети-носія на космодромі Байконур у Казахстані.

Кабіна – у верхній частині ракети [117].

Рух супутника по навколоземній орбіті також складний: на нього діє сила тяжіння Землі, сили тяжіння інших космічних тіл (передусім Місяця, Сонця, Венери, Марса), магнітне поле Землі, тиск Сонячного вітру, а також опір атмосфери (хоч і дуже розрідженої), яка при космічних швидкостях польоту має гальмувальний вплив.

Рух супутника на ділянці зниження і посадки зумовлений зменшенням швидкості польоту. Теоретично на зменшення швидкості апарата до нуля потрібно затратити енергії стільки ж, скільки її було витрачено на розгін апарата. Його здійснюють двома способами: включенням ракетних двигунів соплами вперед – назустріч напрямку руху, а після входження в щільніші шари атмосфери – аеродинамічно – парашутами, і вже біля землі – знову ракетними двигунами м'якої посадки (соплами до поверхні землі).

На ділянці сходження з орбіти супутник має велику енергію, яка складається з кінетичної, зумовленої швидкістю апарата, та потенціальної енергії, спричиненої висотою розташування апарата над поверхнею Землі. Під час проходження атмосфери відбувається аеродинамічне гальмування атмосферою самого корпусу апарата. Перед його носовою частиною виникає ударна хвиля і розпечена газова оболонка. Її температура така висока, що жод-

на з теплозахисних систем і тугоплавких матеріалів не могли б зберегти апарат, якби це тепло повністю передавалось апарату. Він би випарувався в повітрі, не долетівши до Землі. Однак через наявний газотеплообмін з атмосферою (залишенням теплового сліду, "здуванням" тепла і газів та випромінюванням), а особливо через застосування різних способів гасіння швидкості польоту – падіння, штучні супутники Землі успішно долітають до її поверхні і довозять космонавтів та матеріали ДЗЗ.

Оскільки аеродинамічне гальмування взаємодією корпусу апарата з атмосферою зростає зі збільшенням її густини, то нагрів поверхні корпусу швидко росте, але й швидкість польоту швидко зменшується. На розрахунковій висоті розкриваються спочатку малий, а пізніше й великий парашути, на якому апарат опускається вже з "парашутною" швидкістю. Ця швидкість також надто велика, щоб зберегти апарат з матеріалами ДЗЗ або космонавтами від руйнування під час удару об земну поверхню. З огляду на це перед самою землею мусять спрацювати ракетні двигуни м'якої посадки, які діють подібно до стартових – від Землі, але їх потужності вистарчає лише на переборення інерції падаючого апарата і зведення швидкості приземлення до нуля.

### *3.2.2. Параметри орбіт ШСЗ*

Для вирішення практичних завдань, пов'язаних з використанням ШСЗ, потрібно знати розташування супутника в просторі у будь-який момент часу. Цим піклуються центр планування польотів і центр управління польотом (ЦУП). Однак такі параметри, як площина, форма, нахил, зсув, висота орбіти, її апогей і перигей, період обертання супутника, дата і час, висота апарата в момент знімання тощо (рис. 3.17) необхідні і для користувачів матеріалами ДЗЗ.

Площиною орбіти супутника Землі вважають таку уявну площину, яка є дотичною до всіх пунктів орбіти і перетинає Землю в її центрі. Для визначення елементів орбіти користуються поняттям небесної сфери, осі світу, небесного екватора та проекції орбіти на поверхню небесної сфери (див. рис. 3.13). Для оцінки кута нахилу площини орбіти використовують розмір кута $i$ поміж площиною орбіти і площиною небесного екватора. Апогей (найдальший пункт орбіти) та перигей (найближчий пункт орбіти) визначають стосовно поверхні землі, а в разі потреби – від центра Землі.

Орбіти ШСЗ за формою діляться на *кругові та еліптичні. У кругових орбіт* всі пункти орбіти рівновіддалені від Землі (в розрахунках від її центра – центра гравітаційного поля Землі) супутник має однакову кругову лінійну[3] та кутову швидкості. Ці орбіти є найсприятливішими для географічних завдань, бо знімки з такого типу орбіт мають однаковий масштаб зображення земної поверхні і придатні для порівняльних вимірювань. Зазначимо, що на низьких кругових орбітах супутники довго існувати не можуть. *Еліптичні орбіти* мають добре виражені пункти перигею та апогею, тобто змінну висоту над поверхнею Землі, також змінну швидкість руху по орбіті, змінну лінійну та кутову швидкість і, що найважливіше – змінну тривалість перебування над певною стороною Землі. Ці орбіти менш придатні для просторових географічних досліджень, але вигідніші для радіозв'язку із Землею, забезпечення "радіо-" і "телемостів".

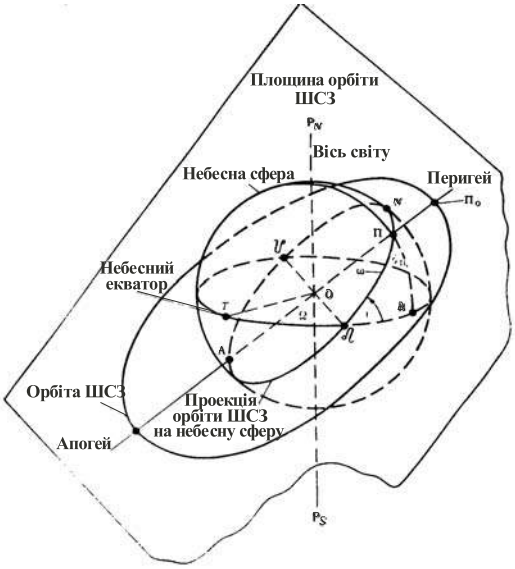



Рис. 3.17. Елементи орбіти супутника з проекцією на небесну сферу.

Мінімальна висота, на якій супутник на круговій орбіті може здійснити хоча б один обліт навколо Землі, дорівнює близько 160 км[4]. Однак, під час теоретичних розрахунків за стандартну орбіту приймають орбіту з висотою 200 км, на якій кругова лінійна

[3] Кругова швидкість у пункті з радіусом 6371 км від центра земної гравітації (середній радіус Землі), тобто умовного пункту на поверхні Землі дорівнює 7,91 км/с, яку називають першою космічною швидкістю.

[4] На нижчих висотах густина атмосфери ще настільки висока, що апарат втратить швидкість і "приземлиться" – опиниться на Землі.

швидкість дорівнює 7,79 км/с. Під час руху супутника по еліптичній орбіті його швидкість змінюється періодично: наростає з наближенням до Землі до пункту перигею і зменшується з віддаленням від Землі до пункту апогею. На цій ділянці важливо не допустити розгону супутника до *"швидкості звільнення"*. Так називають швидкість, під час якої може бути подолана гравітаційна сила Землі, і її супутник перестане бути супутником, а полетить "в мандри" космосом. Значення розрахункової швидкості звільнення (параболічної швидкості) біля поверхні Землі дорівнює 11,19 км/с, а на стандартній орбіті (200 км від Землі) – 11,02 км/с. Цю швидкість прийнято називати *другою космічною швидкістю.* Вона динамічно падає зі збільшенням висоти орбіти (рис. 3.18). Зокрема, на віддалі від Землі, яка дорівнює 10-ти радіусам Землі апарат може мати швидкість 3,53 км/с, і це вже буде "швидкістю звільнення" від Землі. Зазначимо, що швидкість звільнення від впливу Місяця дорівнює, 4 км/с, а від Сонця – аж 619,4 км/с.

Період обертання супутника по орбіті обчислюють за часом, необхідним для завершення оберту в певному просторовому пункті – наприклад, під час проходження перигею. Такий період обертання *називають сидеричним*. Цей період не є постійним, бо залежить від параметрів орбіти, особливо від висоти перигею.

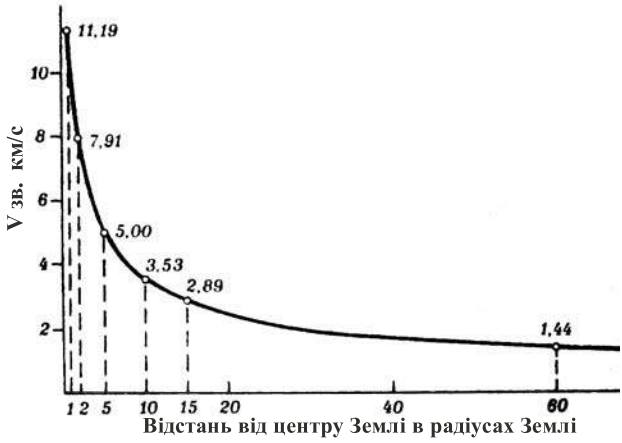



Рис. 3.18. Зменшення швидкості звільнення супутника (вісь ординат) із збільшенням його відстані від Землі (вісь абсцис – в радіусах Землі).

В середньому на один оберт навколо Землі на низьких орбітах затрачають 1,5 – год, а на дуже високих – 24 год.

З наближенням до пункту перигею, тобто з наближенням до Землі швидкість супутника зростає, однак, якщо перигей розташований на висоті, де екзосфера атмосфери Землі вже впливає на супутник своєю густиною і гальмує його швидкість, то такий супутник на наступному оберті вже не досягне попередньої висоти апогею, потім ще знизить висоту перигею, знову апогею і так з кожним обертом параметри будуть змінюватися, доки супутник не знизить свій апогей орбіти до 150–160 км. З такою висотою апогею супутник зможе зробити ще 1–2 оберти навколо Землі і, загальмувавши, згорить в атмосфері або впаде на Землю – перестане існувати. Час, протягом якого супутник літає на орбіті (до його руйнування в атмосфері), *називають часом його існування*. Час існування супутника залежить також від його маси, розмірів, форми, початкової висоти орбіти та збурювального впливу притяганням Місяця та Сонця, інших чинників. Зміни часу існування супутника залежно від параметрів орбіти подано в табл. 3.1.

*Таблиця 3.1*

Час існування (в добах) супутника
вагою 100 кг і діаметром 1м на різних орбітах

| Орбіта кругова | | Орбіта еліптична | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| висота (км) | час існування | висота перигею | час існування при висотах апогею | | | | |
| | | | 500 | 700 | 1000 | 1300 | 1600 |
| 200 | 0,4 | 200 | 9 | 18 | 37 | 58 | 82 |
| 250 | 4 | 230 | 25 | 52 | 102 | 165 | 237 |
| 300 | 20 | 260 | 53 | 116 | 238 | 370 | 535 |
| 350 | 61 | 300 | 114 | 260 | 545 | 890 | 1280 |
| 400 | 605 | 400 | 410 | 1120 | 2630 | 4450 | 6600 |

Скорочений аналіз таблиці показує, що при початковій висоті перигею 230 км і висоті апогею орбіти 700 км час існування супутника становитиме лише 50 діб. Збільшення висоти апогею до 1 000 км приведе до збільшення тривалості існування супутника в два рази. Приблизно таке саме збільшення часу існування супутника зумовить підвищення перигею всього на 30 км. Для кругових орбіт збільшення висоти орбіти з 300 до 400 км спричинює

збільшення часу існування супутника у 8 разів. У разі збільшення висоти орбіти до кількох тисяч кілометрів, де екзосфера атмосфери вже втрачає свій гальмівний вплив, час існування супутника майже необмеженим – він стає постійним супутником Землі. За потреби збільшити час існування супутників на низьких орбітах мусить бути передбачена система двигунів повторного розгону і переведення його на вихідну вищу орбіту.

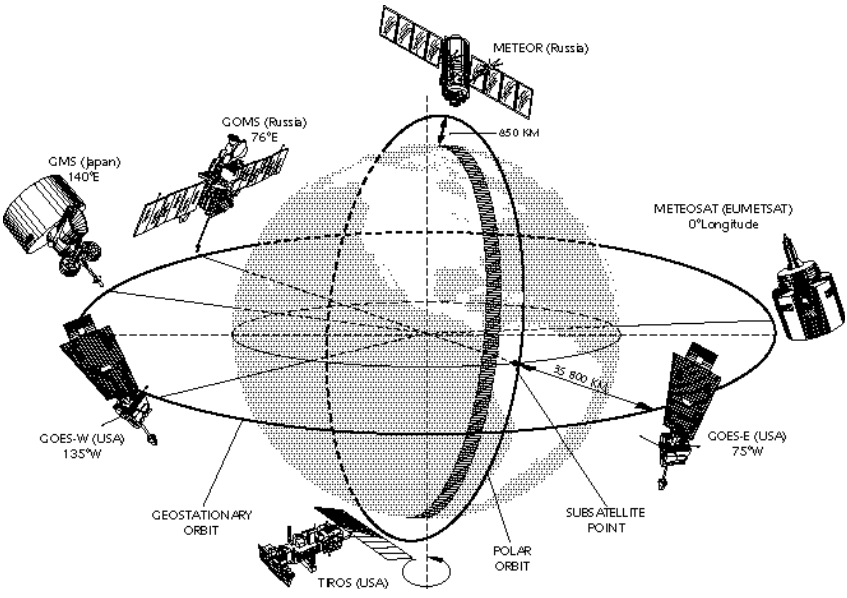
### *3.2.3. Типи орбіт ШСЗ*

Параметри орбіт можуть бути найрізноманітнішими, однак їх об'єднують у характерні типи за кількома ознаками.

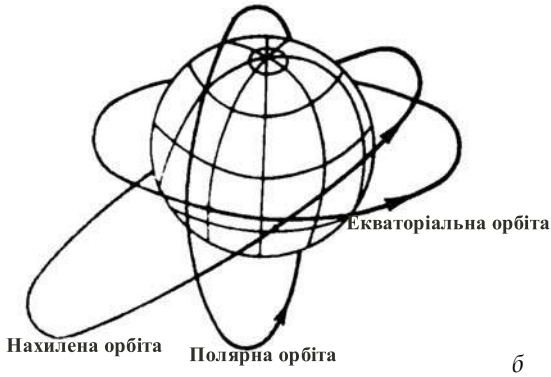
Залежно від кута нахилу орбіти стосовно площини екватора Землі виокремлюють екваторіальні, полярні та нахилені орбіти.

***Екваторіальні** орбіти* вважають такими, коли супутники перебувають в площині екватора, або близько неї (субекваторіальні орбіти) (рис. 3.19). Така орбіта обмежує використання супутника для ДЗЗ приекваторіальним поясом, особливо, якщо вона низька і кругова. Проте цей тип орбіти є важливим для надійного телевізійного зв'язку, якщо його висота досягає 35810 км. За цієї умови період обертання супутника навколо Землі дорівнюватиме періоду обертання Землі навколо осі, тобто зрівняються кутові швидкості супутника і пункту на поверхні Землі, якщо напрямки їхнього обертання збігаються. Супутники на таких орбітах *називають геостаціонарними*, бо вони ніби постійно "висять" над певним пунктом Землі. Зазначимо, що саме з цих орбіт супутники забезпечують трансляції "супутникового телебачення". Кілька таких супутників, що рухаються один за одним з певним рівномірним інтервалом, можуть забезпечити цілодобове транслювання програм на майже всю земну кулю (всі сателітарні антени побутових телеприймачів північної півкулі звернуті до півдня). Однак навіть з висоти геостаціонарної орбіти прямого їхнього бачення (умова стабільного прийняття сигналу) з полярних областей нема.

***Полюсними** (полярними) орбітами називають такі, коли* супутники літають вздовж небесних (неземних географічних) меридіанів, тобто кут площини орбіти до площини екватора дорівнює 90° (див. рис. 3.17) або є близьким до цього (субполярні орбіти). Літаючи по такій орбіті як інерційне тіло, супутник зберігає свою площину обертання, але Земля в цьому "обручі" орбіти




*а*




*б*

Рис. 3.19. Орбіти ШСЗ: *а* – ШСЗ на різних орбітах, *б* – типи орбіт.

продовжує свої добові обертання навколо осі (рис. 3.20). Отже, при кожному новому оберті відбуватиметься зміщення проекції підсупутникової траси на Землю до заходу (Земля крутиться із заходу на схід). Потрібна доба, щоб супутник міг появитися над всіма регіонами планети. Залежно від висоти орбіти супутник з полярної орбіти може виконувати ДЗ поверхні Землі від полюса до полюса.

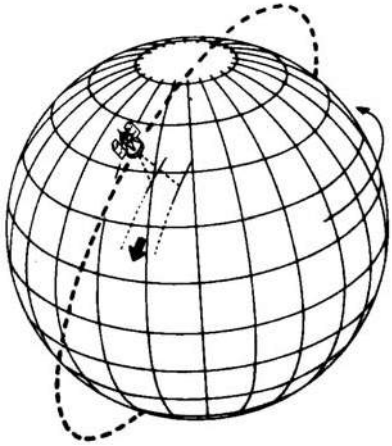


Рис. 3.20. Орбіта супутників "Лендсат-1" – "Лендсат-5".

За цих орбіт важливою є кратність кількості обертів навколо Землі до кількості її обертів навколо осі. Якщо супутник здійснює за один оберт Землі навколо осі скінченне число разів, то такий супутник на наступну добу літатиме вздовж тих самих трас, що й у попередню добу. У цих випадках супутник і його орбіту називають геліосинхронними, тобто синхронними з сонячним часом, за яким живе Земля. По суті це означає, що коли супутник сьогодні появився на довготі Львова о 15 год, то і завтра він буде на цій довготі в той самий час. Ця умова дуже важлива для дослідження наземних об'єктів за однакових умов освітлення і протікання ритмічних процесів, що мають явно виражений добовий (геліосинхронний) режим. Однак з цієї орбіти, якщо вона низька, неможливо виконати знімання всієї поверхні планети (крім стабільних підсупутникових трас).

За умови, що за один оберт Землі навколо своєї осі супутник на полярній орбіті здійснює неповне число обертів (наприклад, 15,5, 17,3 або 16,8), то простежуватиметься зсув проекції підсупутникової траси – так званий *міжобертовий зсув*, а на наступні доби – *міждобові зсуви* орбіти. Такий супутник з'являється над певними пунктами Землі завжди в інший час. Він може виконати (за певний період часу) знімання всієї поверхні Землі без смугових пропусків, але із часовим зміщенням на кілька діб (рис. 3.21).

На субполярних (кут нахилу 99°) кругових орбітах з висотою 917 км літали перші три супутники серії "Лендсат". Вони були також прямі і сонячно-синхронні: з періодом обертання 103 хв. супутники за одну добу робили по 14 обертів. Ширина смуги знімання на поверхні Землі – 185 км. Зміщення підсупутникового надиру на наступний оберт становило 2 785 км по екватору, а на широті 40° – 2 100 км до заходу. На наступний день, а точніше під час 15-го оберту внаслідок деякого нахилу орбіти (99°) відбувається

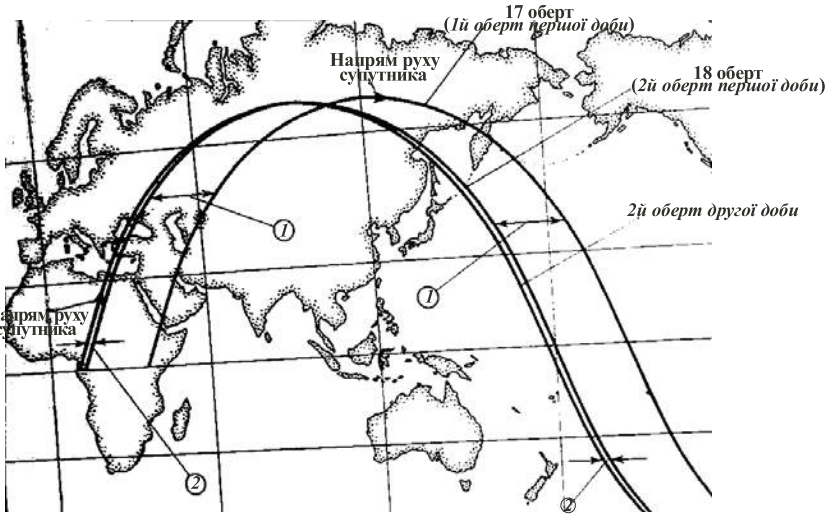



Рис. 3.21. Зсув проекцій орбіт супутника:
*1* – міжобертовий, *2* – міждобовий (за добу супутник виконує 17–18 обертів).

добовий зсув орбіти відносно початкової на 159 км на захід. Через 18 діб, тобто після 251-го оберту, супутник почне повторювати свої оберти першого циклу, причому в той самий час. Знімання Землі можна повторити, але з часовим зсувом 18 діб (рис. 3.22).

Всі орбіти, які мають кути нахилу площин орбіт більші від субекваторіальних і менші від субполярних, належать до групи *орбіт* ***нахилених***. Під час запуску супутників на такі орбіти завжди зазначають кут нахилу її площини. Від цього залежить можливість ДЗЗ у межах певних географічних широт, особливо, якщо це орбіти низькі. Зокрема, якщо супутник запущений на низьку орбіту з нахилом 60° до площини екватора, то він може виконувати знімання від близько 60° північної широти до 60° південної широти. На такі орбіти запускають супутники ті держави, які не мають "інтересу" за межами широт своєї країни. Крім супутників ДЗЗ, на нахилені еліптичні орбіти з великою витягнутістю еліпса запускають супутники зв'язку з таким розрахунком, щоб апогей орбіти був навпроти держави-замовника, бо тоді супутник буде довго перебувати в зоні прямої доступності.

Нахилені орбіти також можна використовувати для супутників *періодичних й неперіодичних*. До перших належать ті супутники

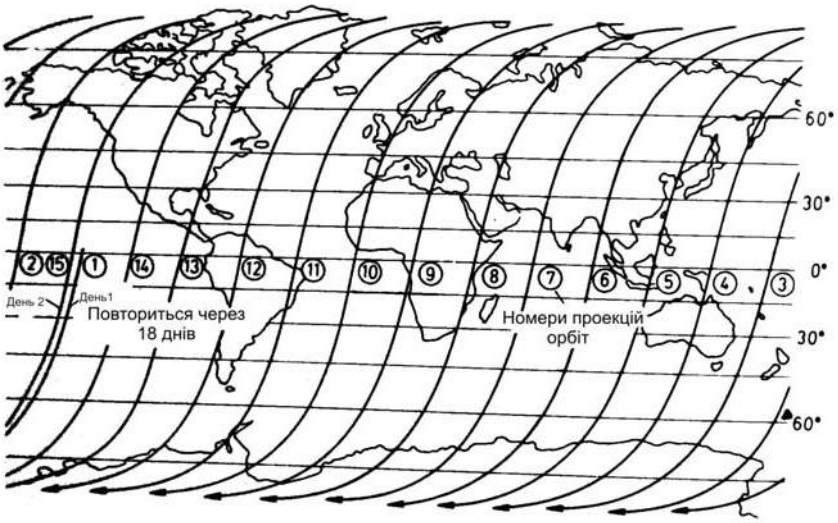



Рис. 3.22. Проекції орбіт супутників "Лендсат" на поверхню Землі.

Землі, які мають такий період обертання навколо Землі, що за одну добу може здійснитися ціле число обертів. Це також геліосинхронна, але нахилена орбіта. Вона цікава ще й тим (на відміну від полярної), що за певних розрахункових умов супутник буде якийсь час рухатися разом із зміщенням границі дня і ночі по земній кулі (хоч і на різних широтах послідовно). Це так звані сутінкові орбіти.

Крім зазначених основних типів орбіт, неполярні орбіти можна кваліфікувати як *прямі і зворотні*. *Прямими* називають орбіти, по яких супутники рухаються в напрямку обертання Землі навколо осі, тобто із заходу на схід. На зворотних орбітах супутники рухаються назустріч обертанню Землі. У них, відповідно, відбувається більший міжобертовий зсув проекції орбіти на поверхню Землі.

За висотою орбіти поділяють на три групи: *низькі, середні і високі*.

До перших належать орбіти з висотами до 500 км. На цих орбітах літають ШСЗ короткої "життєдіяльності" – космічні пілотовані кораблі, деякі супутники, що проводять високоточні знімання (наприклад, для складання топографічних карт і планів).

До середньовисотних орбіт належать ті, що своїми апогеями і перигеями вкладаються в інтервал висот від 500 км до 2000 км. На цих висотах літають супутники метеорологічного, геодезичного, астрономічного призначення та ін. До третьої групи належать орбіти і їхні супутники із значною висотою орбіти – до 36 000 і більше кілометрів. Це супутники зв'язку (радіо і телевізійні), метеорологічні, моніторингові, дослідження космічного простору тощо.

## 3.3. Види дистанційного знімання

Прийнято називати дистанційними ті види вимірювань, які здійснюються на дистанції від об'єкта дослідження без безпосереднього контакту з ним, у тім числі і без сполучення провідниками кабельного типу[5]. Звичайне побутове, а також наукове географічне фотографування – це також спосіб фіксації об'єкта дистанційно. Радіолокація градових хмар в метеорології. Радіолокація військова або навігаційна на кораблях та літаках – це також дистанційні методи. Проте не про ці види зондування і їх матеріали йдеться в нашому підручнику і це вже є виконанням першої класифікаційної умови: будемо розглядати лише матеріали "аерокосмічні".

У назві "аерокосмічні" вже закладені класифікаційні характеристики різновиду дистанційного зондування, але без розділення на "аеро-" і "космічні". Також виразне об'єднання досліджень у певний інтегрований клас, де йдеться про методи і матеріали дистанційного знімання з носіїв апаратури, що літають у межах атмосфери та за її межами, в середовищі, яке умовно іменують "космос"[6]. Зрештою, вживання означення "межа атмосфери" (приблизно 800–2 000 км) також є умовною, бо існує не межа, а екзосфера (потужніша від "власне атмосфери") дуже поступового

---

[5] Раніше дистанційними називали методи дослідження через провідниковий (дротовий) контакт, наприклад дистанційні метеостанції, у яких давачі температури, вологості, вітру та ін. з'єднувалися з реєстратором через кабель певної довжини.

[6] "Космос" з грецького – устрій, порядок.

переходу від атмосфери до міжпланетного (космічного) простору. Наголосимо, що ті супутники, які ми звично називаємо космічними, а людей, що їх пілотують – космонавтами, насправді літають в іоносфері та екзосфері – верхніх розріджених шарах повітряної оболонки[7] Землі.

Багато супутників Землі, що ведуть її дослідження, літають на високих орбітах – до 40 000 км, що є справді поза межами атмосфери. Однак виділяти їх в окремий клас за цією ознакою поки що нема підстав через те, що спотворюючий вплив верхніх шарів атмосфери на випромінювання Землі майже не наростає з висотою (вже від іоносфери). Зрештою, вся апаратура, методи реєстрації, методи передачі результатів знімання приблизно однакові на всіх висотах знімання, що і є підставою для їхнього об'єднання в одну спільну групу. За певними ознаками ця група розділяється на дрібніші виділи – класи.

*Є така класифікація дистанційного знімання :*

1. За використанням діапазонів електромагнітних хвиль;
2. За технічними засобами (знімальною апаратурою);
3. За масштабами матеріалів знімання;
4. За принципами організації знімання;
5. За кутом візіювання об'єктів місцевості;
6. За метою знімання;
7. За роздільною здатністю матеріалів;
8. За регулярністю та повторністю;
9. За способом доставки на Землю;
10. За носіями, формою фіксації та збереженням інформації.

Отже, різні підходи в класифікаціях дають змогу означити належність матеріалів до певних класів згідно з підставами поділу. Цінність такого означення полягає в інформації про ті характеристики матеріалів, які властиві виділеним класам і, що особливо важливо, в розумінні можливості отримати від готових матеріалів потрібну інформацію після свідомого їхнього відбору,

---

[7] За підручниками з метеорології та землезнавства можна вияснити, що атмосферою називають повітряну оболонку Землі, що простягається до висоти 80–800–2000 км, залежно від того, які шари атмосфери є об'єктом дослідження. Більшість штучних супутників Землі та пілотованих "космічних" апаратів літають на висотах 300–600 км , тобто в межах атмосфери (в іоносфері та в екзосфері).

а також в оптимальному формуванні замовлення на знімання для вирішення певних завдань на підставі матеріалів з потрібними можливостями матеріалів.

Одні і ті ж матеріали можуть одночасно належати до кількох класів. Для прикладу назвемо один з варіантів означення класифікаційної належності уявного замовлення комплекту знімків: багатозональні, сканерні, дубль-негативні, середньомасштабні, високої роздільної здатності, маршрутні, панорамні, універсальні, посезонні, зі супутників на геліосинхронних орбітах, без передачі інформації по радіоканалах, на ортохромних фотоплівках типу "Мікрат".

### *3.3.1. Види знімання за використанням діапазонів електромагнітних хвиль*

Використання діапазонів електромагнітних хвиль як підстави для класифікацій дистанційного знімання є одним із значно поширених (разом з класифікаціями за використанням знімальної апаратури) (рис. 3.23). Така класифікація ґрунтується на принципових відмінностях інформації, яку можуть переносити

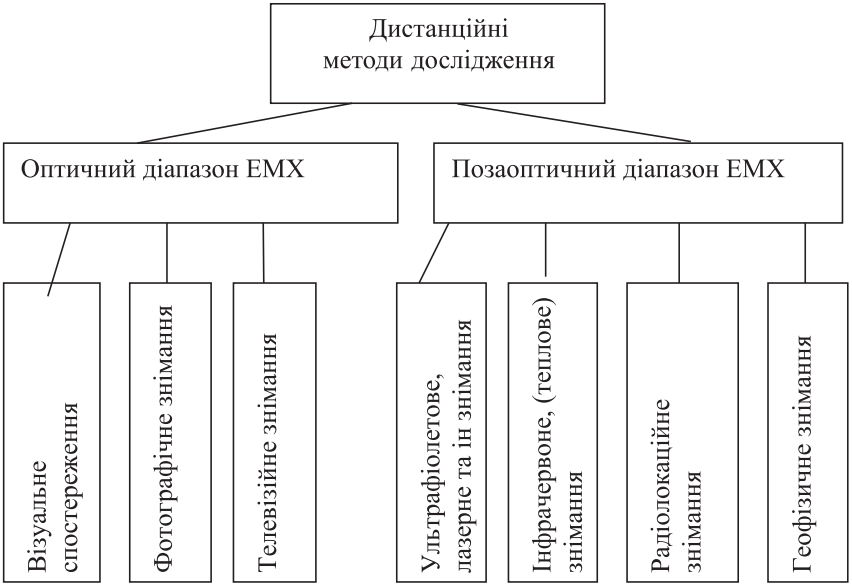



Рис. 3.23. Головні види знімання за належністю до діапазонів ЕМХ.

електромагнітні хвилі певної довжини і частоти[8]. Відповідно до фізичних характеристик хвиль використовують пристрої – знімальну апаратуру з її облаштуванням та допоміжними функціональними блоками, спеціально пристосованими до роботи в певному діапазоні електромагнітних хвиль. Спектр ЕМХ при ДЗЗ можна використовувати з охопленням широких його "відрізків", вузьких частин окремо чи груп вузьких частин поєднано.

Розділення ЕМХ за видами знімання в зоровому та позазоровому діапазонах ЕМХ дає змогу виокремити ті види знімань, які базуються на сприйнятті людського ока і недоступні для людського зору, хоч інформацію з допомогою спеціальних технологічних перетворень можуть зробити придатною для зорового сприйняття та розумового аналізу.

Візуальні спостереження виникли як спосіб дистанційного аерокосмічного дослідження вже під час перших "повітроплавань" на повітряних кулях, пізніше на літаках і за останні майже п'ять десятиліть – на пілотованих космічних апаратах. У всіх випадках людина відігравала роль аналізатора дистанційної інформації, сприйнятої очима і проаналізованої силою думки та на підставі набутих знань. З часом роль пілота ускладнилася, і він поступово збільшував відсоток своєї участі в ролі оператора знімальної апаратури. Сьогодні за успішного застосування автоматики і комп'ютерного керування дистанційними дослідженнями роль візуального спостереження як методу продовжує залишатися важливим, особливо при аерозніманнях та експертних оцінках ситуації в регіонах прояву природних катастроф чи небезпечних ситуацій (повені, пожежі, аварії суден з виливами забруднень, як це відбулося у листопаді 2007 р. в Керченській протоці). Крім того, людський зір відіграє головну роль під час опрацювання знімків. Продуктивність цих методів значно залежить від фізіологічних можливостей суб'єкта – приймача та від його професійної підготовки.

З огляду на це пропонуємо інформацію про властивості людського зору в аспекті усвідомлення його можливостей і порівняння з можливостями технічних засобів.

---

[8] Інформація про властивості ЕМХ – в розділі 1.2.

### *Зоровий аналізатор*

У пропонованих аспектах зоровий визнають досконалим біологічним пристроєм, який складається з двох частин: приймачів випромінювання – очей та аналізаторів сигналів від ока – зорових центрів мозку.

Кожне око є приймачем світла і водночас ширококутною оптичною системою з великим полем зору. Побачене (зір) двома очима приводить до зосередження у вужчому полі, чим забезпечується виразність. Поле зору залежить також від освітленості, яскравості, та контрастності, кольору об'єктів.

Світловий потік, що проникає в очі, фокусується живою лінзою – "кристаликом" на сітчатках очей, які складаються зі спеціальних світлочутливих нервових клітин – колбочок (сприйняття денного світла і кольору) та паличок. Це рецептори, які перетворюють енергію світлових хвиль на відповідні електричні сигнали, що по нервових волокнах (зоровий нерв) передаються до зорових центрів у мозку (рис. 3.24).

Важливим для розуміння багатьох властивостей зору є наявність в людей двох очей і двох зорових центрів у мозку, причому кожне око посилає праву половину свого поля зору до правого зорового центру, а ліву – до лівого зорового центру в мозку. У випадку здорового зору людина не відчуває такого поділу і сприймає поле зору як певний суцільний овал. Кожне око зокрема має свій овал – поле зору, в межах якого забезпечується сприйняття зображення, нормальне розрізняння об'єктів за відбитими від них світловими хвилями певної сили чи кольорового складу. Частини полів зору кожного ока накладаються, перекриваються і саме в цій частині забезпечується найкращий зір (рис. 3.25). Нормальним полем зору людини обома очима є овал з розгорткою 180°. Поле зору кожного

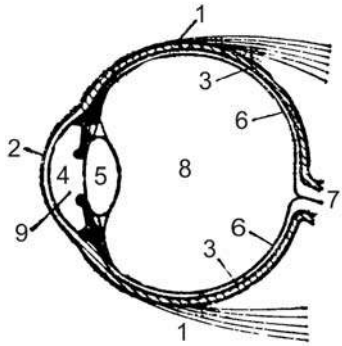



Рис. 3.24. Будова ока людини:
1 – білкова оболонка;
2 – рогова оболонка;
3 – судинна оболонка;
4 – зіниця; 5 – кристалик;
6 – сітчаста оболонка;
7 – нерв; 8 – скловидне тіло;
9 – передня камера.

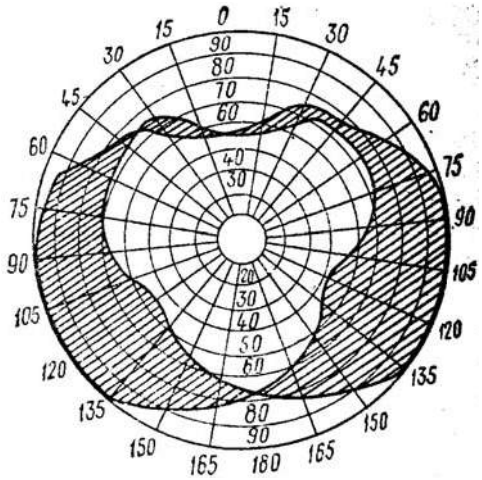



Рис. 3.25. Індикатриси поля зору обох очей. Заштриховані області справа і зліва від центральної вісі належать правому і лівому оку, відповідно. Біле поле всередині графіка – область бінокулярного зору.

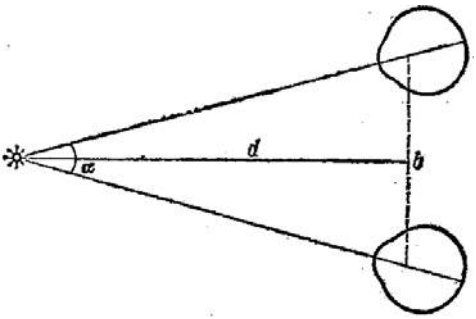



Рис. 3.26. Схема розглядання предмета двома очима дає змогу задовільно оцінювати відстані до предметів (***d***) з урахуванням стабільної бази (***b***) і змінного кута (***α***).

ока зокрема по горизонталі дорівнює приблизно 150° (від оптичної осі в бік носа – 60°, вбік виска – 90°), а по вертикалі 120° (вверх від горизонталі – 50°, вниз – 70°).

У центральному полі, що дуже важливо для ДЗЗ, здійснюється також можливість зорових вимірювань: розрізняння віддалей до об’єктів, правильна оцінка їхніх форм, розмірів, розташувань стосовно один одного, стосовно горизонтальних та вертикальних ліній. На такій особливості зору ґрунтується також змога отримання стереоефекту під час дешифрування знімків зі стереоскопом чи й без нього (рис. 3.26).

З огляду на специфіку зорового сприйняття розробляють та конструюють прилади для опрацювання дистанційних матеріалів, а також знімальні апарати (плівкові та цифрові фотоапарати, відеокамери), які своєю конструкцією по суті наслідують будову ока. Водночас від специфіки зорового сприйняття конкретної людини залежить поле зору, роздільна здатність ока на коротких чи далеких відстанях, а також оцінка кольорів, відстаней, освітленості, через що в ДЗЗ чи під

час користування оптичними приладами у разі дешифрування знімків врахування особливостей зору суб'єкта є значно важливим (аж до недопуску до виконання певних робіт).

Очі, на відміну від технічних оптичних пристроїв, можуть змінювати свою чутливість до кількості світла в мільйони разів (адаптаційна здатність), що є життєво важливим для людини. Проте ця зміна кількості світла (власне через адаптацію – пристосування) сама людина може оцінити лише приблизно (на відміну від точного вимірювання технічними засобами – фотометрами, люксметрами, експонометрами), а тому вимірювання світла очима є ненадійним.[9]

З усього спектру ЕМХ, навіть в межах невеликого оптичного діапазону (0,001–1 000мкм), око може сприймати дуже вузьку його частину – від 0,4 до 0,8 мкм (іноді 0,3–0,9мкм). До цієї зони не належать ультрафіолетові хвилі і сторони коротших та інфрачервоні – зі сторони довших хвиль оптичного діапазону. Саме в цій частині – від фіолетових до червоних хвиль проявляється феноменальна здатність ока розрізняти ще вужчі частини спектру цих хвиль. Кожну з цих ділянок людина сприймає як певний колір, якому надано певного словесного означення (кольори в різних мовах називаються інакше).

В українській мові ці частинки спектра мають свої назви для певних довжин хвиль, використовуючи які подаємо нижче таблицю з метричними значеннями довжин хвиль цих кольорів, сформовану за даними різних авторів (назви кольорів перекладені з російської мови) (табл. 3.2).

При денному світлі найбільшу чутливість очі мають до довжин хвиль 0,556 мкм, тобто в зелених хвилях. Людське око розрізняє дуже багато відтінків зеленого, жовтого та помаранчевого кольорів, вони сприймаються як найяскравіші та найприємніші для ока[10].

---

[9] Фотографи під час вибору тривалості експозиції плівки (в неавтоматичних фотокамерах) виконують розумовий підрахунок світла, оцінюючи конкретну ситуацію освітлення об'єкта фотографування, або користуються фотоекспонометрами.

[10] Така чутливість людського ока до зелених, жовтих та оранжевих хвиль, що мають найвужчі діапазони, вироблена в ході еволюції життєвими потребами – розрізняти в природному оточенні їстівні рослини, їхню дозрілість. Це також свого роду дистанційне зондування.

"Крайні" кольори від центру зорового діапазону є найширшими за довжинами хвиль, тобто в них зменшується чутливість ока, а поза цими кольорами в ультрафіолетовому та інфрачервоному діапазонах чутливість ока взагалі анулюється.

*Таблиця 3.2*

Спектральний склад зорового діапазону ЕМХ
(за різними авторами)* – Показники відсутні

| Назва кольору | Довжина хвиль (в нанометрах[11]) | |
|---|---|---|
| | За Г. Рябухіним, 1976 | За Ю. Книжніковим, 1980 |
| Фіолетовий | 380–440 | 390–450 |
| Синьо-фіолетовий | 440–470 | * |
| Синій | 470–485 | 450–480 |
| Голубий | 485–500 | 480–510 |
| Зелено-голубий | 500–520 | * |
| Зелений | 520–550 | 510–550 |
| Жовто-зелений | 550–570 | 550–575 |
| Жовтий | 570–580 | 575–585 |
| Оранжево-жовтий | 580–590 | * |
| Оранжевий | 590–600 | 585–620 |
| Оранжево-червоний | 600–620 | * |
| Червоний | 620–760 | 620–800 |

Можна виділити декілька основних напрямів успішного застосування аеровізуальних досліджень: наприклад при загальногеографічному, ландшафтному і топографічному вивченні і картографуванні місцевості, при вивченні і картографуванні окремих компонентів ландшафту (геологічної будови, ґрунтів, культурної і природної рослинності, при вивченні геоморфологічних процесів, міграції морських льодів, динаміки снігового покриву.

Великі можливості у вивченні Землі відкривають безпосередні спостереження земної поверхні з борту пілотованих космічних кораблів. З космічної висоти видно об'єкти місцевості реґіонального характеру, які не вдається бачити з поверхні землі, чи з літаків. Вони виділяються за рахунок здатності ока людини генералізувати зображення – око людини не сприймає дрібних

[11] Один нанометр дорівнює: 10-9м, 10-6мм, 10-3мкм, 10A° (ангстрем).

деталей ландшафту, але виділяє крупні його елементи. Цьому ж сприяє "ефект просвічування" давніх великих геологічних розломів, стародавніх русел, перекритих товщею відкладів новішого геологічного часу.

Чіткість візуальних спостережень космонавтів з ПКК залежать від гостроти і контрастної чутливості зору, від характеру (розмірів, яскравості) об'єктів, висоти Сонця над горизонтом, прозорості атмосфери і контрасту об'єкту на тлі місцевості.

Для упевненого розпізнавання наземних об'єктів визначені їх мінімальні кутові "допуски": при помірному контрасті – 10′ при високому –1′, при низькому – 20′.

При висоті орбіти близько 200 км для помірно контрастних об'єктів мінімальний зоровий кут забезпечує розрізняння об'єктів розміром приблизно 600 м (для висококонтрастних – 60 м, для низькоконтрастних – 1 200 м). Лінійно-витягнуті об'єкти розпізнаються значно легше, і цей граничний розмір зменшується до смуг шириною 20–40 м.

Найсприятливіші умови спостереження за природними об'єктами з космосу забезпечуються з висот 250–300 км при кутах візіювання в межах від 0 до 45° від вертикалі. При цьому смуга земної поверхні становить 300–400 км.

Висока цінність візуальних спостережень з космосу залежить також від досконалості людського ока як вимірювального інструмента. Одна з таких важливих характеристик зору – спектральна роздільна здатність, яка дає змогу проводити найбільш тонкі дослідження. Око людини сприймає близько мільйона кольорових відтінків, що відрізняються за параметрами яскравості, насиченості колірного тону.

Під час зорового сприйняття інформація про земну поверхню, розпізнавання окремих об'єктів залежать від величини їхнього контрасту (або відносного перевищення яскравості). На деякому фоні об'єкт видимий тоді, коли його контраст перевищує деяку порогову величину, визначену для конкретних умов. Для різних оглядових систем величина цього порогу суттєво різна. Зокрема, око людини, на деяке зниження його контрастної чутливості в умовах невагомості, розрізняє об'єкти, що мають контраст близько 1–2%. Фотографічні і телевізійні системи в цьому сенсі менш чутливі, і їхні порогові значення контрасту лежать у межах

10–20 %. Однак інформаційні можливості сучасної фотографії у низці випадків є ширшими від можливостей людського зору, і за допомогою спеціальних видів фотографії можна зареєструвати те, чого не видно неозброєним оком.

Важливим також є здатність людини не тільки бачити, реєструвати прийнятий "сигнал", а й можливість невідкладного його аналізу. Варто навести кілька прикладів успішного застосування візуальних космічних досліджень. Зокрема, візуально з орбіти вдалося під пісками в Каракалпакії виявити величезну "лінзу" прісної води (геологи не зазначили наявності тут підземних джерел прісної води). Підтвердилися також ознаки наявності нафти на півострові Мангишлак та в Дніпропетровсько-Донецькому регіоні.

Найцікавішими та інформативними виявилися візуальні дослідження Світового океану. Під час спостереження за Світовим океаном з космосу особливо добре помітні великі зміни колірного тону океану в океанічних фронтальних зонах там, де контактують водні маси різної насиченості суспензіями, на межах крупних течій, на мілководді. Тому зони змішення цих вод є виразними. З висоти декількох сотень кілометрів упевнено визначаються акваторії з винесеними намулами річкових вод в морі. На мілководдях видно рельєф дна.

Такі рідкісні явища, як сріблясті хмари, що утворюються на великих висотах, є мало дослідженими, і в цьому питанні космонавтами виконана значна робота з їхнього фотографування й опису.

З орбіти космонавти спостерігали і нові явища. Зокрема, хмарний серпанок може грати роль збільшувальної лінзи крізь яку, ніби через "лупу", можна добре розрізнити навіть окремі хвилі в океані. Також космонавти спостерігали явище зміни рівня води в океані у формі високого водяного підняття серед спокійної води. Подібне явище в океані раніше не спостерігалося, і вченим ще належить вивчити причину такої швидкої і виразної зміни рівня води.

***Фотографічне знімання***

Цей вид знімання виконують в межах зорового діапазону. Після винайдення плівки типу "Інфрахром", чутливої до ближньої частини інфрачервоних променів, вдається виконувати фотографування також в інфрачервоних хвилях. З огляду на це можна вважати, що фотографування здійснюється на підставі використання

відбитого сонячного проміння і можливе тільки на тій частині планети, де на час пролітання літака чи супутника наявна *денна пора доби.* Ця специфіка є одним із суттєвих обмежень можливостей фотографічного знімання неосвітлених (природно чи штучно) об'єктів. Іншим обмеженням стосовно фотографування наземних об'єктів є непрозорість для оптичних хвиль густого хмарного покриву. За наявності хмар на фотографіях із супутників чи висотних літаків зображаються верхні поверхні хмар. Зрештою, фотографування хмар є метою більшості метеорологічних супутників.

Під час аерофотознімання експонування аерофотоплівки здійснюється на борту літака, а фотографічна обробка виконується вже на Землі в спеціальних лабораторіях.

Під час космічного фотографування можливі два варіанти обробки фотоплівки: на борту космічного літального апарата або на Землі, коли експонована в космосі фотоплівка буде туди доставлена (в капсулі, що спускається, або в транспортному космічному кораблі). Такий спосіб дуже сповільнює час, що проходить між моментом знімання і можливістю наземного використання результатів знімання, що обмежує оперативність всього процесу ДЗЗ, але зображення залишається високоякісним.

У разі хімічного опрацювання експонованої фотоплівки на борту КЛА зображення фотоплівки повинне бути автоматично проскановане і в електронній формі каналами радіозв'язку прислане на Землю. Цей спосіб скорочує отримання зображення на Землі до кількох годин, але під час радіопередачі втрачається значна частина тої якості, яка властива фотозображенням.

Незважаючи на зазначені обмеження, фотографічний метод аерокосмічної зйомки є головним методом вивчення нашої планети і процесів, що відбуваються на ній. За допомогою цього методу отримують найбільш цінну та унікальну інформацію. Без аерокосмічного фотографування зараз не можна освітити практично жодної з проблем, пов'язаних з вивченням природних ресурсів Землі, з вирішенням господарських, наукових та прикладних завдань.

Фотографічне знімання виконується за допомогою *фотоапаратів* різної конструкції[12] і різних призначень, проте принцип

[12] Детальніша інформація в розділі "Апаратура дистанційного знімання".

отримання за їхньою допомогою зображень є однаковим. Всі фотоапарати складаються з світлонепроникної камери, об'єктива зі спеціальним набором оптичних лінз, та світлочутливого елемента чи світлочутливого матеріалу (фотопластинки, фотоплівки). Світло від об'єкта знімання може бути пропущене в фотокамеру через об'єктив в момент "експозиції", тобто оперативного відкриття діафрагми об'єктива. За його допомогою світло фокусується на фокальній площині, на місці якої вставляється світлочутливий елемент, на якому формується скрите зображення, яке наступними процедурами перетворюється в явне позитивне чи негативне зображення.

Усі фотоапарати формують *зображення по окремих кадрах* – іконках зменшеного зображення всього поля огляду на момент знімання. Це дає змогу порівняння фототонів об'єктів поля знімання на цей час за однакових умов їхнього освітлення, що є однією з *переваг* фотоапаратів, які можна використовувати в наукових дослідженнях.

Від конструктивних особливостей об'єктива фотоапарата залежить кут його огляду, *чіткість зображення, роздільна здатність, правильність передачі геометричних характеристик* зображення: довжин ліній, кутів, площ, масштабу по площині знімка, тобто форм, розмірів наземних об'єктів. Зазначимо, що сучасні фотоапарати є *найдосконалішими* кадровими знімальними пристроями: центральні частини кадрів знімків формуються майже без спотворень і з такою високою роздільною здатністю, яка не може бути реалізованою світлочутливими матеріалами та приймачами.

Правильність формування зображення фотоапаратами перевіряється пробними фотографуваннями спеціальних зображень, – так званих мір (рис. 3.27), що складаються зі зображень радіальних клинів, концентричних кіл, штрихових квадратів різної величини чи інших геометричних фігур, розташованих у строгому порядку відповідно до параметрів тестування (роздільна здатність, правильність передачі довжин ліній, кутів, розмірів, контрастності, чіткості, детальності і т. п.). Такі міри можна фотографувати також з літака чи космічного пілотованого апарата, бо вони будуються на поверхні Землі в розмірах, що відповідають висоті знімання.

Дуже важливими є також можливість *правильної передачі світлотонів та кольорів*. Ці властивості лише частково залежать від

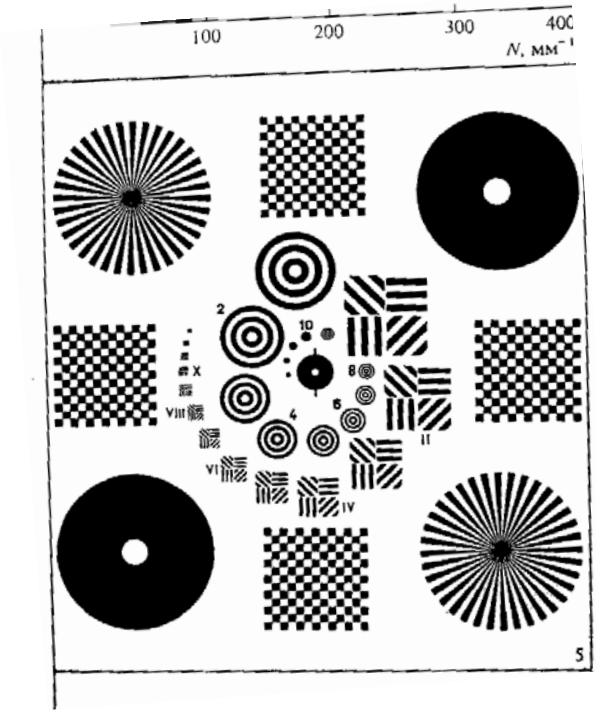



Рис. 3.27. Міра для перевірки якості фотографування фотокамерами. (*Пояснення до рисунка*. Спіраль з 13 комплектів концентричних кілець та спіраль з 13 чотириелементних смугастих квадратів здрібнюються від першого до останнього і служать для визначення якості зображення в центрі знімка. Фотоапарат, яким сфотографовано міру, зміг добре показати всі елементи лише до восьмого комплекту. Круги з радіальними клинами по кутах знімка використовуються для оцінки впливу розміру контрастних об'єктів на роздільну здатність знімка. Клини доходять до центра круга, але наслідком недосконалості фотоапарата, яким сфотографовано міру, є поява в центральній частині круга спочатку невиразного сірого, а в самому центрі – чорного кружечка).

об'єктивів фотоапаратів і формуються світлочутливими приймачами–фотоплівками чи фотоелектричними матрицями.

Фотоплівки та фотоматриці служать для фіксації зображення і мають найрізноманітніші конструкції, від яких залежать їхні властивості. Перед виконанням знімання фотоплівки підбираються залежно від мети ДЗЗ. Світлочутливі матриці також можуть бути відповідно підібрані чи налаштовані.

Світлочутливі прошарки плівок можуть компонуватися з різних емульсій, які містять світлочутливі зерна – мікрокристалики (найчастіше – галогеніди срібла). Їх світлочутливість зумовлена властивістю змінюватися під впливом світла, а саме: під час потрапляння на них фотонів світла в цих зернах відбувається фотохімічна реакція, інтенсивність якої пропорційна кількості (порції) світла.

Цей процес невидимий, а тому таке зображення називають скритим. Після фотографування плівки обробляють (здебільшого в умовах повної темноти) у водних багатокомпонентних хімічних розчинах, де проходить хімічна реакція з відновленням іонів срібла до металічного, потім "закріпляють" цей стан, вимиваючи неосвітлені в час фотоекспонування зерна і тим позбавляють фотоемульсію залишкової світлочутливості. Після проявляння і висушування плівки зображення стає видимим та зафіксованим, і з ним можна проводити операції світлографічного опрацювання: збільшення, копіювання, перетворення на позитивне зображення, тонування, контрастування, фотофільтрацію тощо.

Залежно від чутливості зерен у шарах емульсії до світлових хвиль різної довжини розрізняють плівки з високою чи низькою світлочутливістю. Вища чутливість є у плівок з більшими зернами, через що їх застосовують для фотографування в умовах слабкого освітлення при великих швидкостях співвідносного руху знімального апарата (на супутнику) або об'єкта знімання (в побуті – знімання спортивних об'єктів), коли потрібно застосовувати дуже коротке світлоекспонування. Проте такі плівки під час збільшення зображення дають зернисту структуру, а тому таке зображення не можна збільшувати багаторазово (10–100 разів) без втрати якості. Замість деталізації зображення у разі його збільшення появляється зображення зерен емульсії. З огляду на це крупнозернисті плівки для фотографування з космосу мають певні обмеження.

Плівки дрібнозернисті мають понижену світлочутливість, проте дають змогу отримати високоякісне детальне з високою роздільною здатністю зображення. Під час *багаторазового* збільшення таких зображень можуть появлятися нові елементи зображення земної поверхні, яких не було видно на плівці при кількаразовому збільшенні зображення (рис. 3.28). Це означає, що зерна

фотоемульсії є настільки малими, що потребують багаторазового збільшення, щоб виявити скрите в них зображення. Такі плівки дуже вигідні для фотографування з космосу, однак потребують добрих умов освітлення та об'єктивів з великою світлосилою, щоб позбутися ймовірного "змазування" зображення через рух фотоапарата.

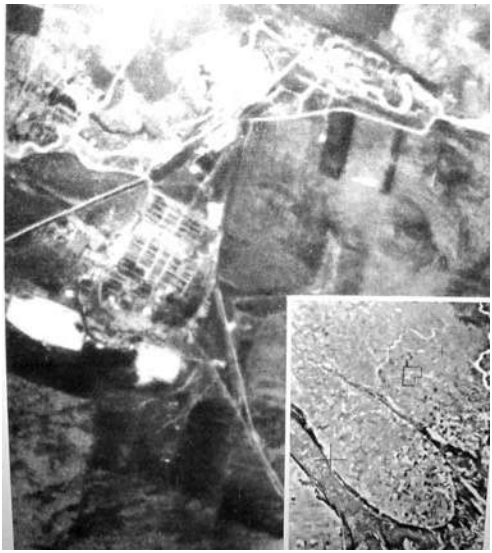


Рис. 3.28. Зображення з одного фотокадру майже без збільшення (внизу справа в білій рамці та при 25-разовому збільшенні (відповідає частині незбільшеного зображення, обведеного чорною, тонкою, кутовою рамочкою). На збільшеному зображенні видні елементи зображення, яких не можна побачити на зображенні без збільшення.

Фотографічні плівки можуть бути чорно-білі і кольорові, позитивні і негативні, відповідно до чого призначене фотографічне знімання.

На чорно-білих позитивних плівках зображення світлих об'єктів прямо пропорціональне їхній яскравості. На чорно-білих негативних плівках зображення об'єктів обернено пропорціональне їх яскравості, тобто найсвітліші об'єкти виглядатимуть найтемніше.

На кольорових позитивних плівках (слайдових) зображення формуватиметься в кольорах, близьких до природних, такими, якими вони сприймаються очима. На кольорових негативних плівках проявлене зображення матиме кольори невідповідні реальним (наприклад, червоний колір зобразиться синьо-зеленим), однак під час друкування на фотопапір все зображення відтворюється в кольорах, близьких до реальних.

Зазвичай для кольорового фотографування застосовують тришарові плівки, в яких верхній світлочутливий шар чутливий до синіх променів (рис. 3.29), під ним залягає шар жовтого світ-

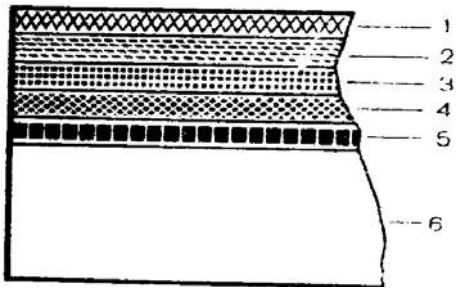



Рис. 3.29. Будова кольорової фотоплівки:
1 синьосвітлочутливий шар, 2 – жовтий фільтровий шар, 3 – зеленочутливий шар, 4 – червоночутливий шар, 5 – зелений протиореольний шар, 6 – целулоїдна основа.

лофільтра, непроникний для променів синьо-фіолетових кольорів. Другий світлочутливий шар чутливий до зелених променів, а третій – до червоних. Після експонування в кожному шарі створюється приховане одноколірне зображення. Після кольорового проявлення отримують кольоровий негатив, в кожному світлочутливому шарі якого створюється свій додатковий колір, тобто у верхньому шарі замість синього створюється жовтий; у середньому шарі замість зеленого – червоний, а в нижньому шарі замість червоного – голубий. Отже, кольорове зображення об'єкта на негативі буде забарвлене не в натуральні, а в додаткові кольори.

По суті, в кожному з шарів кольорової фотоплівки створюється зображення земної поверхні у відповідному діапазоні ЕМХ, до якого чутливий цей діапазон. Тому кольорову фотоплівку можна трактувати як композит спектрозональних плівок (в одній плівці), навіть як своєрідне "багатозональне знімання", про яку зазначаємо нижче, але без можливості розділення на окремі зони, окремі шари.

Для отримання правильного кольорового відтворення на позитивне виконують друкування з кольорового негативу на "кольоровий[13]" фотопапір або на "кольорову" позитивну плівку, на яких виходить забарвлення, близьке до вихідних натуральних кольорів.

Окрім кольорової негативної плівки, є і так звана кольорова оборотна слайдова плівка, на якій після кольорового проявляння

[13] Насправді цей фотопапір білий, але також кількашаровий, створений для позитивного зображення кольорів об'єктів після його "насвітлення" через "кольорову" негативну плівку і проявлення у відповідних розчинах.

безпосередньо виходить позитивне кольорове зображення сфотографованих об'єктів.

Плівки для чорно-білого та кольорового фотографування компонуються з таких шарів світлочутливої емульсії, якості яких пристосовані для забезпечення необхідних умов та потреб знімання: однакове, чи вибіркове сприймання всіх довжин зорового спектру, рівномірну чи підсилену чутливість у певних зонах оптичних ЕМХ. Зазначимо, що плівки поділяються на: *несинсибілізовані, ортохроматичні, ізопанхроматичні та панхроматичні*[14].

*Несенсибілізовані плівки* чутливі тільки до фіолетових, синіх та голубих променів (від 400 до 500 нм). Вже на границі голубих і зелених променів світлочутливість цих плівок дорівнює нулю.

*Ортохроматичні плівки* чутливі до довжин хвиль від 400 до 600 нм, що забезпечують фіолетові, сині, голубі та жовті кольори. З деяким пониженням чутливості до зелено-жовтих і жовтих променів.

*Ізоортохроматичні плівки* подібні за властивостями до попередніх, але без пониження чутливості до зелених хвиль.

*Ізохроматичні плівки* мають чутливість майже до всіх кольорів (від 400 до 650 нм), крім обмеження в діапазоні червоних хвиль.

*Панхроматичні плівки* чутливі в діапазоні від 400 до 700 нм, тобто від фіолетових до темночервоних з деяким послабленням чутливості стосовно зелених хвиль.

*Ізопанхроматичні плівки* подібні за чутливістю до попередніх, але без пониження чутливості в зеленій зоні спектру.

*Інфрахроматичні плівки* мають підвищену чутливість до інфрачервоних хвиль в діапазоні від 650 до 980 нм, тобто до тих хвиль, які називають червоно-інфрачервоними.

За використанням спектру оптичних хвиль фотографічне знімання поділяють на *інтегральне, спектрозональне та багатозональне.*

*Інтегральним* називають таке фотографування, коли в об'єктив фотоапарата пропускаються всі довжини хвиль, що потрапляють у його поле зору. Аналогом дистанційного інтегрального косміч-

---

[14] В назвах плівок застосовані слова грецького походження: *ізо* – рівний, однаковий; *орто* – прямий, правильний; *пан* – все, всеохоплючий; *хром* – колір.

ного знімання може бути звичайне аматорське фотографування без застосування світлових фільтрів та спеціальних фотоплівок.

*Інтегральне фотографування буває чорно-білим і кольоровим, негативним і позитивним*, залежно від специфіки світлочутливого матеріалу, який використовують. Сам фотоапарат не потребує під час переходу від одного знімання до іншого жодних конструктивних змін (винятком може бути застосування нейтральних та поляризаційних[15] світлофільтрів, коли іншими способами (діафрагмою чи тривалістю експозиції)) скоректувати інтенсивність світлового потоку виявляється неможливим чи недоцільним.

*Спектрозональним* називають таке знімання, за якого певним способом виокремлюються та фіксуються хвилі якоїсь потрібної частини оптичного діапазону. Під час такого знімання об'єктив фотоапарата обладнують додатковими світлофільтрами, що обмежують доступ одних і підсилюють вплив інших хвиль, а також застосовують для фотографування спеціальні плівки з підвищеною чутливістю до одних хвиль і пониженою – до інших. При застосуванні жовтих світлофільтрів частково поглинаються хвилі фіолетових та синіх кольорів; під час застосування жовто-зелених світлофільтрів поглинаються червоні і фіолетові кольори; оранжеві фільтри поглинають повністю сині і фіолетові кольори, а червоні фільтри повністю поглинають сині і зелені промені. Можна застосовувати фільтри різної оптичної цільності, тобто з різним ослабленням та поглинанням світлових потоків, а також комбінації світлофільтрів для виокремлення хвиль потрібних довжин, тобто певних зон спектру. Спектрозональні знімки фіксуються на чорно-білих чи кольорових фотоматеріалах і вирізнятимуться тим, що на них виразно зобразяться ті об'єкти, для яких властивим є випромінювання певних довжин хвиль, виокремивши які можна легше їх віднайти, віддешифрувати. Наприклад, за потреби віддешифрувати поля пристиглої пшениці успішно може бути застосоване спектрозональне знімання на фотоматеріали з підсиленою чутливістю до зони спектру, яка властива для зрілої пшениці.

---

[15] Поляризаційні фільтри застосовують для захисту від поляризованого світла, що виникає при проходженні через сприятливі для цього оптичні середовища, для захисту від відблисків поверхонь із "дзеркальною" індикатрисою.

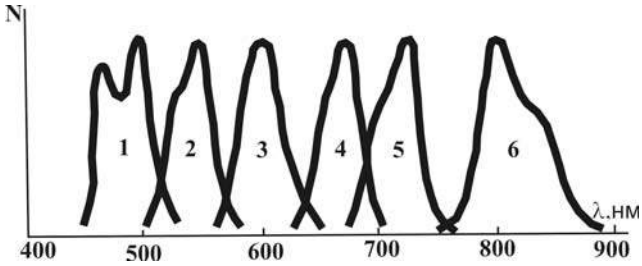



Рис. 3.30. Спектральна чутливість камер комплекту МКФ 6.

*Багатозональним зніманням* вважається таке знімання наземних об'єктів, яке виконується блоком з кількох апаратів, візирні осі яких є паралельними і кожен з яких виконує спектрозональне знімання тої самої території і в той самий час. Прекрасним зразком такого комплекту є МКФ-6 ("многозональная камера фотографическая 6-объективная") спільного виробництва Радянського Союзу і Німецької Демократичної Республіки[16]. На рис. 3.30. показано налаштування чутливості кожної з камер на сприйняття ЕМХ певної довжини.

Через те, що до фотоплівок кожного з фотоапаратів доходять хвилі певних довжин (наприклад, окремо синіх, зелених, жовтих, оранжевих, червоних та ближніх інфрачервоних), то з причини селективного випромінювання наземних об'єктів кожен з апаратів зафіксує на чорно-білу фотоплівку своє оригінальне зображення однієї і тієї ж території в "своїх" фототонах, але з різницями оптичної щільності фототонів кожного з об'єктів. Зокрема, на знімках у синьому діапазоні водні об'єкти можуть зобразитися світлими, а на знімках в зеленому, а особливо в оранжевому та червоному діапазонах – чорними. Інші об'єкти, відповідно до властивої їм спектральної яскравості (спектрального образу об'єкта) проявлять свою специфіку й отримають відповідне зображення.

Під час порівняння знімків, отриманих у різних спектральних діапазонах, і за наявності інформації про відповідні спектральні образи об'єктів можна виконати правильне дешифрування навіть маловідомих об'єктів, де спеціалісту-дешифрувальнику не доводилось бувати.

---

[16] Опис камери МКФ-6 – у розділі 3.4.

Для первинної обробки багатозональних знімків застосовують спеціальні проектори, які дають змогу оптичним способом накладати проекції кількох зображень багатозонального одночасного знімання (до чотирьох), пропущених через кольорові фільтри на один екран. Результатом є змога появи на екрані одного поєднаного зображення в адитивно накладених, синтезованих кольорах, які залежно від умов накладання (синтезу) можуть виявитися близькими до натуральних, частково або повністю відмінних (умовних), що не погіршує, а навпаки, сприяє успішності дешифрування.

Матеріали, отримані з космічного корабля, на якому працювала камера МКФ – 6, "Союз-22", дали змогу виявити значну кількість областей застосування багатозонального знімання (фотографування) і для вирішення конкретних природознавчих завдань. Зокрема, було показано, що за допомогою багатозональних космічних фотознімків земної поверхні можна:

– розрізняти сільськогосподарські культури і їхній стан;

– вивчати процеси і засолення ґрунтів, а також рослинні індикатори, засолення;

– визначати склад геологічних порід і потужність пухких відкладів, виділяти локальні структури, що вміщують родовища корисних копалини;

– вивчати рельєф морських, озерних і річкових мілин, донні відклади, підводну рослинність;

– виявляти забруднення вод і переміщення намулів;

– виявляти забруднення повітря, аерозолів і вологи в атмосфері.

Надалі експерименти з багатозональним зніманням були продовжені на орбітальних станціях "Салют-6" (1979 р.) і "Салют-7" (1983 р.), де камери МКФ-6 та вдосконалена МКФ6М встановлюються вже як штатні знімальні прилади.

В останні десятиліття (від 1990 р.) набули широкого застосування так звані *цифрові фотоапарати*, в яких на "матриці" створюється "електронне" зображення. Щодо використання діапазонів ЕМХ знімання аматорськими цифровими камерами можна назвати інтегральним зніманням. Однак можливим є також спектрозональне і багатозональне, а також "нічне" фотографування за певних конструктивних можливостей знімальних камер. Цифрові фотоапарати наближені до кадрових телевізійних камер, можуть виконувати знімання відеофільму.

Рис. 3.31. Зображення піксельного екрану:
зліва – не збільшене, справа – зображення центральної частини,
збільшене в 6 разів.

Точність такого зображення залежить від оптичних характеристик об'єктива, а також від кількості та щільності упакування елементів матриці (кількості пікселів на площу світлочутливої матриці). Фотозображення з матриці перезаписується на власну або вставну карту електронної пам'яті і зберігається у формі, аналогічній до комп'ютерної пам'яті. Відповідно, цей запис можна "зчитати" в комп'ютерну пам'ять візуально аналізувати на моніторі та опрацьовувати за допомогою типових та спеціалізованих програм комп'ютера. Правильність передачі довжин ліній, кутів та природних кольорів дещо порушується. Більш обмеженою є допустима кратність збільшення зображення (рис. 3.31). Натомість розширеним є діапазон освітлення, в якому виконуються знімання. Розширеним є також діапазон ЕМХ, який може бути сприйнятий цифровим фотоапаратом. Важливою особливістю цифрових фотоапаратів є повна автоматизація визначення відстані до об'єктів знімання і встановлення чіткості фокусування, а також визначення і встановлення тривалості експозиції, тобто ті всі параметри, від яких залежить якісне відтворення зображення. Фотознімки, отримані за допомогою сучасних цифрових фотоапаратів, майже досягли якостей традиційних оптичних плівкових фотоапаратів.

Під час застосування цифрових фотоапаратів немає потреби тривалих процедур хімічного опрацювання плівок та фотопаперу. Це скоротило швидкість отримання дистанційного зображення до секунд. Зафіксоване цифровими фотоапаратами зображення мож-

на одразу ж через кабель перепровадити в пам'ять комп'ютера, а у разі фотографування зі супутника отримане зображення по радіоканалах може бути передане на Землю або записане в спеціальні носії електронної пам'яті, розміри якої порівняно з об'ємами запису на фотоплівки майже безмежні.

***Телевізійне знімання***

Телевізійне знімання виконується в тому ж діапазоні ЕМХ, що і фотографічне, але з невеликим розширенням в бік ультрафіолетових та інфрачервоних хвиль з охопленням всього оптичного діапазону. Під час телевізійного знімання використовують інший тип знімальних апаратів – телевізійні знімальні камери[17].

Для вирішення багатьох завдань дослідження Землі, а особливо для прогнозу метеорологічних умов в атмосфері і тих або інших явищ у Світовому океані необхідно отримувати своєчасну інформацію з періодичністю до декількох разів на добу. У цьому випадку фотографічні методи (плівкові апарати) не можуть бути достатньо оперативними і цю проблему вирішують з використанням телевізійних систем.

Телевізійна зйомка з космосу може виконуватися у видимому і інфрачервоному діапазонах спектру. Для зйомки зі супутників використовують кадрові і сканувальні телевізійні системи.

У першому випадку використовують об'єктив зору, достатнім для одночасного проектування на світлоелектричний перетворювач зображення досить великої ділянки Землі. Сукупність послідовних кадрів дає зображення ділянок земної поверхні вздовж траси польоту КЛА. Зображення, отримане на екрані видікона[18], безпосередньо передається по радіоканалах на наземні приймальні станції в ті моменти, коли супутник перебуває в зоні прийому станцій, радіус якого, зазвичай, становить кілька тисяч кілометрів. Після передачі на наземну станцію радіосигнали за допомогою електронно-променевої трубки або інших приладів перетворюються на зображення.

---

[17] Інформація в розділі "Апаратура дистанційного знімання".

[18] Відикон – один з типів світлоелектричних приймачів, світлоприймальна пластина якого складається з фоторезисторів, які змінюють свій опір проходження струму обернено пропорційно кількості світла, що потрапляє на них.

Разом з оптичними телевізійними системами широкого розповсюдження набули оптико-механічні багатозональні ***сканувальні телевізійні системи*** – сканери.

Зображення земної поверхні за допомогою сканувального пристрою і фотоелектронного підсилювача перетвориться в цих системах у відеосигнал, який по радіоканалу передається на Землю. На приймальній апаратурі, проходячи через "телеграфний" блок, відеосигнал знову стає зображенням.

Просторова роздільна здатність у цій телевізійній системі залежна від миттєвого поля "зору" дзеркала сканувальної системи, а спектральні характеристики – від розділових фільтрів і чутливості приймачів випромінювання. Ширина смуги огляду залежить від висоти польоту носія знімальної апаратури та амплітуди кута приймального дзеркала[19]. Зображення від дзеркала потрапляє в оптичний об'єктив, а з нього – на фотоперетворювач (фотокатоди[20], фотопомножувачі[21]) і на реєстратор або радіопередавач.

За одне "хитання" дзеркала, яке здійснюється поперек напряму руху носія сканера, формується одна лінійка (скан) зображення, яка складена з багатьох (тисяч) елементів – пікселів, кожна з яких є фактично одномоментним зображенням дуже малих діляночок земної поверхні в дзеркалі, що відповідає його полю зору – огляду (рис. 3.32). Розрив між пікселами виконує "обтюратор" – механічний обертовий пристрій, що на мікродолю часу опиняється на шляху світлових променів і перешкоджає їхньому проходженню до фотоелектричного перетворювача. На наступному "хитанні" дзеркала формується другий скан, а з наступними ритмічними коливаннями дзеркала – наступні скани, з яких формується "безперервна" смуга зображення вздовж траси польоту супутника, яка записується на бортові пристрої пам'яті або відразу передається на Землю.

---

[19] Опис сканера подано в розділі "Апаратура дистанційного знімання".

[20] Фотокатод – електрод, який віддає електрони під дією світла, що формує фотострум. Інтенсивність виділення електронів прямо пропорційна енергії світла та різниці потенціалів на електродах (до "струму насичення").

[21] Фотопомножувачі – фотоелектропомножувачі – підсилювачі фотоструму.

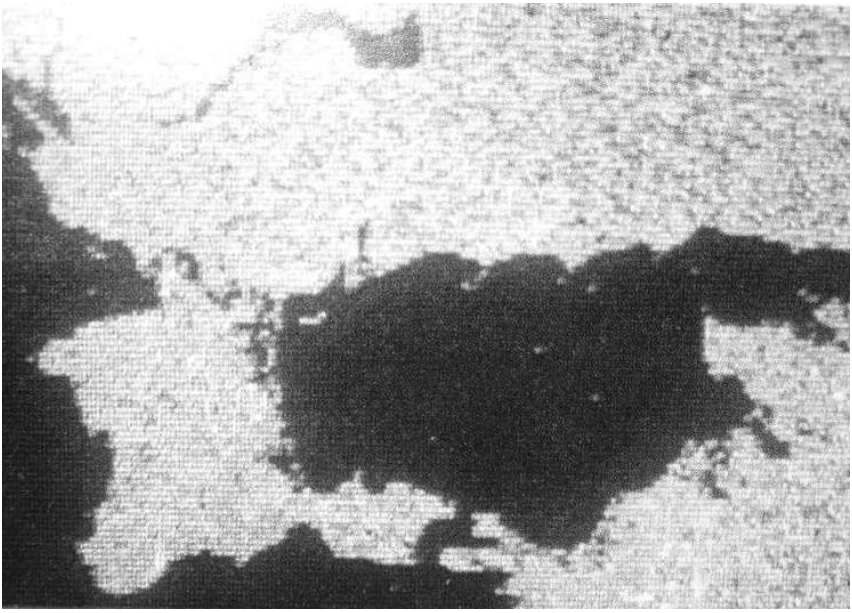


Рис. 3.32. Структура сканерного знімка – видно ряди пікселів і кожен піксел. (поза морем).

Перші телевізійні системи, починаючи з 1960-х р., встановлювали на метеорологічних супутниках "Тайрос", "Німбус", "ЕССА", "НОАА", "Космос", "Метеор". Знімки виконували в масштабах 1:20 000 000 – 1:5 000 000, мали невисоку роздільну здатність на місцевості (2,5–3 км). Дрібний масштаб телевізійних знімків і значна генералізація зображення давали змогу вивчати не тільки хмарність, а й геологічні структури регіонального порядку, крупні геологічні глибинні процеси, які не можуть бути вивчені за аерознімками і космічними знімками великого масштабу.

Прикладом оптичної телевізійної апаратури слугують камери, встановлені на метеорологічних ШСЗ "Метеор" або камери американського супутника "Лендсат". Його камери проводили знімання в трьох спектральних діапазонах: 0,47–0,57 (зелено-блакитна частина спектру), 0,58–0,68 (жовто-червона і 0,69–0,83 мкм (ближня інфрачервона частина спектра. Об'єктиви

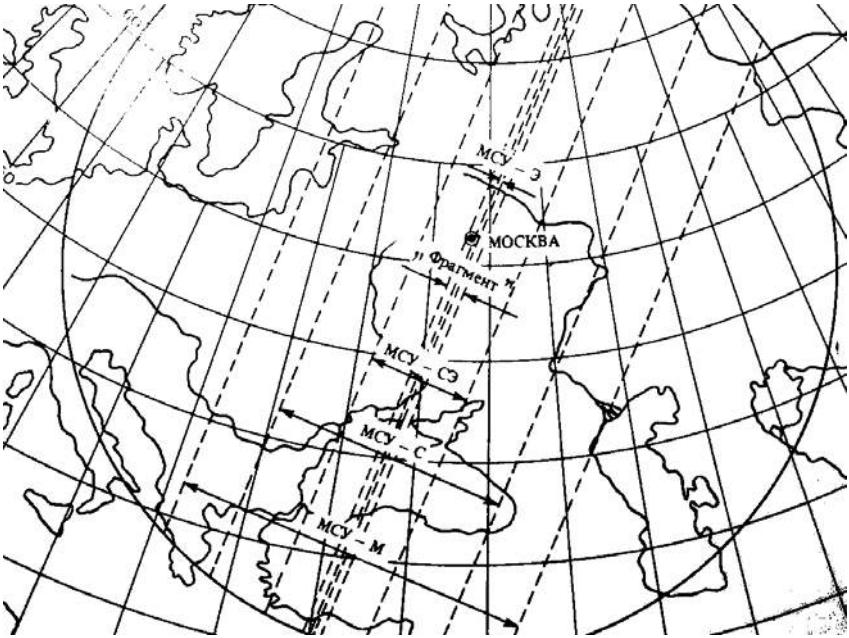



Рис. 3.33. Смуги знімання сканерів серії МСУ (БСП).
МСУ – многозональное сканерное устройство
(БСП – багатозональний сканерний пристрій).

камери мають фокусну відстань f=126 мм, кут зору кожної камери – 15°,9.

Особливістю роботи телевізійної системи є те, що передані на наземну станцію зображення можуть аналізуватися окремо або синтезуватися в єдине кольорове зображення.

Перший експериментальний супутник системи "Метеор", на якому була встановлена багатозональна оптико-механічна скануюча система, був виведений на орбіту в 1974 р. До складу апаратури ШСЗ вели чотириканальні сканувальні пристрої малої роздільної здатності (МСУ-М) і двоканальні сканувальні пристрої середньої роздільної здатності (МСУ-С). У МСУ-М сканування здійснюється під кутом 106° з частотою чотири рядки на секунду. При цьому забезпечується знімання смуги земної поверхні шириною понад 2 000 км з роздільною здатністю близько 1 км. У МСУ-С земна поверхня знімається з детальністю до 140–250 м

під кутом огляду 90°. Частота сканування 48 рядків у секунду, якої досягають вже не гойданням дзеркала, а обертанням дзеркальної піраміди (рис. 3.33).

Матеріали зі сканерів супутників "Метеор" широко використовують в організаціях гідрометеорологічної служби, морського флоту і рибного господарства, лісового і сільського господарства, інших відомств, де потрібна оперативна інформація про Землю.

Досконалість телевізійної апаратури постійно підвищується. Зокрема, ресурсні супутники "Лендсат 2-3" були обладнані кадровими телевізійними камерами RBV і багатозональними оптико-механічними сканерами VSS, що давало змогу отримувати знімки в чотирьох спектральних діапазонах у зоровій та ІЧ-зонах спектра з роздільною здатністю на місцевості 80 і 40 м масштабом зображення 1:1 000 000 і повторюваністю знімання через 18 діб.

На ШСЗ "Лендсат-4", окрім сканера MSS, встановлювали багатозональний сканер TM ("Thematic Mapper"), який забезпечував отримання знімків у семи каналах електромагнітного спектру, охоплюючи і тепловий ІЧ-діапазон. Роздільна здатність на місцевості отриманих знімків при ширині охоплення одним знімком 185 км становила 30 м. Сьогодні на супутниках "Лендсат-7" стоїть сканер ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) розрізненням 15 м. На супутниках "IKONOS", "QuickBird", "EROS", "OrbView", "IRS" сканерні сенсори виконують знімання місцевості роздільної здатності 0,61–0,42 м у панхроматичному режимі.

Прогресивним видом дистанційного зондування сьогодні є *повітряне лазерне сканування* місцевості з одночасною прив'язкою через GPS-приймач до географічних координат. Таке знімання виконують високоточним сканером, зокрема LIDAR (Light Detection and Ranging), розташованим на борту літака (пропозиція фірми Leica Geosystems). Новою пропозицією від Центру інфраструктурних проектів (м. Москва) є також програмний комплекс "ОРТОЛАЗЕР", який створює цифрові тривимірні векторні моделі об'єктів місцевості й ортофотоплани за матеріалами повітряного лазерного сканування та аерофотознімання. Знімання рельєфу проводять з точністю 15–20 см, у тім числі на заліснених, важкодоступних, а також непідготовлених геодезично територіях. У випадку повітряного лазерного сканування отримують дані не тільки про місцевість, а

й про інженерно-технічні споруди, розташовані на ній. Матеріали знімання дають змогу створити 3d моделі рельєфу, аерофотомозаїку масштабу 1:5 000 і 1:1 000, отримати інформацію про конструкційні й експлуатаційні параметри інженерних споруд і будівель, розраховувати технічні параметри об'єктів за їхніми тривимірними моделями. Спільне опрацювання зображень лазерного сканування і цифрового фотографування дає змогу виконувати віртуальні прольоти над реальною місцевістю. Користувач, сидячи за сотні кілометрів від досліджуваної території, має змогу вивчати її на екрані монітора з роздільною здатністю до 20 см.

Технологія повітряного лазерного сканування з часом може замінити традиційні способи отримання аерофотоінформації і польові роботи. Нині її найбільше застосовують для опрацювання даних, які стосуються проектованих нафтопроводів, шляхів залізничних сполучень і для кадастрового обліку. Таким чином, сучасні технології отримання й опрацювання аероматеріалів хоч і мають значну собівартість, проте забезпечують високу точність і достовірність. На їхнє доставлення й опрацювання затрачають значно менше часу, ніж колись.

Отже, телевізійне, особливо сканерне знімання, швидко розвиваються і покращуються: досягнуто дуже високої роздільної здатності (в межах 1 м), в десятки і сотні разів збільшена кількість вузьких каналів ЕМХ, збільшена змога автоматичного (комп'ютерного) дешифрування. Залишається також поза конкуренцією серед видів знімання швидкість отримання результатів знімання на Землю до споживачів – вже в процесі знімання.

Проекція знімка сканера у напрямі лінії польоту за своїми властивостями тотожна ортогональній, а в перпендикулярному – відрізняється від неї.

Під час лінійного сканування з постійною кутовою швидкістю масштаб запису уздовж рядка визначається відношенням швидкості руху світлової плями при відтворенні, наприклад, по екрану електронно-променевої трубки до кутової швидкості сканувального дзеркала. Зі збільшенням кута візування масштаб елемента зображення, відповідного до миттєвої точки зору сканера, змінюватиметься. Це призводить до стиснення зображення на бокових краях (стосовно напрямку польоту носія) сканерного знімка. Тому мережа квадратів на плоскій місцевості зобразиться на знімку

сканера прямокутниками, а на краях – трапеціями. Найбільш близька до ортогональної проекції центральна частина сканерного знімка. Центральну лінію вздовж знімка називають лінією нульових спотворень.

За своїми геометричними властивостями сканерний знімок, що складається з окремих послідовно отримуваних елементів, поступається кадровому. Проте знімання сканера є неперевершеним за змогою використання вузьких знімальних зон електромагнітних хвиль для отримання зображення у всіх спектральних діапазонах (у 5–10 разів вужчих, ніж під час фотографічного знімання). Швидка передача сигналів сканера і порівняно просте переведення знімка в цифровий формат, зручний для комп'ютерної обробки, – переваги знімання сканером. Сьогодні сканерне знімання – головний вид оперативного космічного знімання. Знімальні системи сканерів на ресурсних супутниках виконують багатозональне знімання в спектральних зонах 0,4–0,5; 0,5–0,6; 0,6–0,7; 0,7–0,8; 0,8–1,1; 1,5–1,7; 2,0–2,3 мкм. Для географічних досліджень використовують як з'єднані багатозональні зображення, так і зображення по кожному окремому каналі (табл. 3.3).

*Таблиця 3.3*

Призначення спектральних діапазонів тематичного картографа ТМ ШСЗ "Лендсат"

| № | Довжина хвиль, мкм | Заявлене призначення діапазону |
|---|---|---|
| 1 | 0,45–0,52 | Оцінка хлорофілу і каротину в рослинних покривах та розпізнавання листопадних і вічнозелених рослин |
| 2 | 0,52–0,60 | Оцінка відбивної здатності рослин в зеленому діапазоні |
| 3 | 0,63–0,69 | Оцінка поглинальної здатності хлорофілу для певного виду насаджень |
| 4 | 0,76–0,90 | Оцінка відбивної здатності рослин в ближньому ІЧ-діапазоні для визначення кількості біомаси |
| 5 | 1,55–1,75 | Визначення вологості рослин та розпізнавання снігового і хмарного покриву |
| 6 | 2,08–2,35 | Оцінка вологості рослин і вмісту іонів окисів гідрогену в ґрунтах |
| 7 | 10,4–12,5 | Температурне картографування |

### *Інфрачервоне (теплове) знімання*

Інфрачервоне (ІЧ) теплове знімання, яке забезпечує отримання видимого зображення шляхом реєстрації невидимого ІЧ-випромінювання, в ближній та середній частинах ІЧ-хвиль реєструють не відбите випромінювання зорового діапазону, а власне теплове випромінювання радіаційно активного шару.

Оскільки природні об'єкти – ґрунти, породи, водні об'єкти суші, морів і океанів, різнозволожені та заболочені ділянки суходолу і мають різну температуру, то і інтенсивність теплового випромінювання у них буде різною. За даними реєстрації цих випромінювань можна судити про теплофізичні властивості об'єктів, їх геометричні ознаки, щільність, вологість та ін.

Інтенсивність теплових випромінювань природних об'єктів вимірюється сканувальними радіометрами інфрачервоного діапазону, які працюють аналогічно до звичайних сканувальних приладів видимого діапазону. Як і в оптико-механічних сканерах, вони складаються з оптичної системи, приймального пристрою і пристрою обробки та видачі інформації. Прийняті зі Землі інфрачервоні промені перетворюються в спеціальних пристроях на джерела світла різної інтенсивності, за допомогою яких на звичайній чорно-білій фотоплівці реєструється температура земної поверхні. Отже, інформація ІЧ-діапазону на вигляд відповідає чорно-білій негативній фотографії, і на ній різними відтінками сірого тону виділяються ділянки земної поверхні, що мають різну температуру. На таких знімках найбільш холодні об'єкти зображаються світлішими тонами, а теплі – темними.

Зазначимо, що ця інформація має суттєві перешкоди, пов'язані з впливом атмосфери. Значні ділянки земної поверхні можуть бути закриті хмарами і не зобразяться на ІЧ- знімках, оскільки випромінювання в цих хвилях не проходить через хмари. Чутливість інфрачервоної апаратури під час знімання з ШСЗ становить 2–3°, а у разі знімання з літаків – 0,5–1°. Геометрична точність елементів деталей зображення на таких знімках становить від сотень метрів до декількох кілометрів.

З наявних у цьому діапазоні трьох вікон "прозорості" атмосфери для теплових хвиль використовують здебільшого два: 3–5 мкм і 8–14 мкм.

У діапазоні 3–5 мкм для вивчення власного теплового випромінювання Землі знімання виконують вночі, оскільки денна сонячна радіація вносить перешкоди. У діапазоні довших хвиль – 8–14 мкм знімання можна виконувати вдень і вночі. Під час денних знімань отримують температурний показник, зумовлений нагрівом сонячними променями і внутрішньою теплотою Землі. Під час нічних знімань можна отримати теплову характеристику лише власного теплового випромінювання Землі.

Проведені літакові і супутникові дослідження застосування теплового знімання дають змогу дійти висновку про високу ефективність цього методу знімання під час визначення температури різних ділянок суші і водної поверхні, виявлення зони тектонічно активних областей, термальних зон і зон сучасного вулканізму, районів неглибокого залягання ґрунтових вод, зміни зволоження ґрунтів тощо.

У наший країні розроблена методика і створені прилади для використання теплового аерознімання для дослідження природних ресурсів. Зокрема, за допомогою двоканального тепловізора "Вулкан", який встановили на літаку АН-30, виконувалося теплове знімання на Камчатці, в Казахстані, Середній Азії тощо. Були знімки високого температурного розділення – 0,25–0,5° (в каналі 8–15 мкм), які успішно використовували для вирішення гідрогеологічних та інженерно-геологічних .

Певну перспективу має ІЧ-теплове аерознімання під час пошуків родовищ корисних копалини. Визначено, що нафтогазоносні структури та деякі рудні тіла створюють на поверхні Землі теплові аномалії, які фіксуються на цих знімках.

З використанням ІЧ-апаратури досліджуються теплі та холодні течії в океанах, створюються щодобові карти температури поверхні Світового океану в глобальному масштабі.

***Геофізичне знімання в радіодіапазоні***

Унікальні можливості для вивчення природних ресурсів з космосу дає зйомка в мікрохвильовому радіодіапазоні спектру електромагнітних хвиль. Радіофізичні методи знімання в цьому діапазоні можна поділити на два види:

1) *радіотеплове (інфрачервоне (ІЧ) знімання, надвисокочастотне (НВЧ)-знімання,* які ґрунтуються на реєстрації власного радіовипромінювання наземних об'єктів у тепловому та надвисокочастотному діапазонах;

2) *радіолокаційне (РЛ)-знімання*, яке ґрунтується на реєстрації хвиль, посланих бортовим радіолокатором і відбитих наземними об'єктами.

*При ІЧ- та НВЧ - зніманнях* застосовують пасивні радіотехнічні системи, здатні сприймати дуже слабкі електромагнітні сигнали в ІЧ- та НВЧ-діапазонах ЕМХ, які посилає будь-яке фізичне тіло, що має температуру вищу від абсолютного нуля. Кількість випромінюваної енергії залежить не тільки від фізичної температури об'єкта, але також від його хімічного складу, структури та шорсткості поверхні. Хвилі НВЧ-діапазону від 0,1 до 30 см, випромінені наземними об'єктами, можуть бути прийняті антенами радіометрів. Залежно від довжини хвилі, на яку налаштована антена радіометра, сприймається сигнал з відповідною інформацією. Зокрема, найкоротші радіохвилі несуть інформацію, що визначається температурою поверхні випромінювача, довші – про температуру, вологість поверхневого шару випромінювача, а найдовші хвилі цього (НВЧ) діапазону майже повністю залежні від запасів вологи в ґрунті, які визначають так звану діелектричну проникність ґрунту для радіохвиль. Товщина шару, з якого відбувається випромінювання радіохвиль, дорівнює або кратна довжині хвилі. Реєстрація сигналу відбувається у формі запису лінією інтенсивності випромінювання по трасі польоту носія апаратури на рухомій стрічці. Після аналізу запису інтенсивності та спектру (якщо радіометр має кілька каналів) сприйнятого сигналу, можна давати означення об'єктам та класифікувати їх. Під час зіставлення запису з картою, на якій нанесена траєкторія польоту носія радіометра, можна "прив'язати" рівень сигналу до природних елементів земної поверхні, а за наявності кількох таких паралельних трас складають відповідні карти (температури поверхні ґрунту (рослинності) чи вологозапасів орного (30 см) шару ґрунту)[22].

Прозорість земної атмосфери для радіохвиль велика, навіть за наявності хмар. Це дає змогу з допомогою радіометодів прово-

---

[22] Науковці та студенти географічного факультету Львівського університету ім. І. Франка разом з київськими і рівненськими спеціалістами та молдавськими льотчиками забезпечували роботи з апробації ІЧ- та НВЧ-радіометрів. Експерименти проводились на території навчального полігону Дністерського географічного стаціонару (Єзупіль) та на Рівненській тестовій ділянці.

дити дослідження там, де важко або неможливо використовувати оптичні методи. Атмосфера Землі і в цьому діапазоні частково впливає на випромінювання земної поверхні, проте порівняно із зоровим та інфрачервоним діапазонами спектру вплив атмосфери в радіодіапазоні значно слабший.

Просторове розрізнення зображень, що отримують НВЧ-радіометри, неоднакове для різних довжин хвиль радіодіапазону. Під час роботи на коротших хвилях можна отримати інформацію з підвищеним просторовим розділенням, а під час роботи на довших хвилях – інформацію зниженої точності. Крім того, необхідно враховувати той факт, що під час зондування земної поверхні за допомогою пасивної НВЧ-радіометрії на хвилях понад 30 см зростає "шум космосу", що маскує корисний сигнал, а на хвилях коротших від 0,1 см чутливість радіометрів обмежується атмосферними умовами.

Є сфери застосування НВЧ-радіометрів для географічних досліджень:

- Під час дослідження суші – це картографування снігових покривів, виявлення термальних джерел, виявлення лісових пожеж, картографування ділянок, покритих рослинністю, дослідження засолення і вологості ґрунтів, дослідження стану посівів і прогнозування урожаїв, дослідження геоморфологічних структур, тектонічних зон і розломів тощо.
- Під час дослідження океанів – визначення меж крижаних полів, товщини крижин, напрямів їхнього дрейфу, стану хвилювання, визначення районів нафтового забруднення Світового океану.
- Під час дослідження атмосфери можуть завдання з виявлення конвективної хмарності, зон опадів і грозової діяльності, оцінки інтенсивності опадів, визначення температури атмосфери на різних висотах.

### *Радіолокаційне знімання*

Радіолокаційне знімання належить до методів, які ґрунтуються на вловлюванні ЕМХ мікрохвильового діапазону, відбитих від наземних об'єктів, попередньо генерованих радіолокатором.

Під час використання матеріалів радіолокаційних знімань дешифрувальнику необхідно знати і тип радіолокатора, довжину хвилі, на якій він працює, кут спрямованості антени, специфіку відбиття радіохвиль різної довжини природними та штучними поверхнями.

Стан земної поверхні і довжина радіохвиль зумовлюють характер відбиття ЕМХ. Якщо розміри нерівностей поверхні менші ніж половина довжина хвилі (долі сантиметра), то така поверхня об'єкта є для радіохвиль гладкою і розсіювання енергії практично не відбувається. Тому такі об'єкти, як гладка водна поверхня, такири, солончаки, зображаються на РЛ-знімках найбільш темними тонами. У разі розміру нерівностей, понад півдовжини генерованої хвилі, відбувається дифузне розсіювання енергії. Воно залежить від розміру нерівностей, їхньої форми, орієнтування щодо сканувального променя. Такі поверхні зображаються на РЛ-знімках сірими тонами різної щільності. Наявність рослинності збільшує поглинання радіохвиль. Світлими плямами зображаються на РЛ-знімках міста, великі промислові центри.

При цьому інтенсивність прийнятого сигналу є характеристикою відбивної здатності елемента поверхні в радіодіапазоні. Унаслідок розгортки прийнятого сигналу на екрані приймальної електронно-променевої рубки виникне зображення рядка, відповідне до опроміненої радіоімпульсами смуги місцевості. Перед екраном електронно-променевої трубки встановлюють оптичну систему для реєстрації зображення радіолокації на фотоплівці.

Станції радіолокацій кругового – (РЛС КО) і бічного оглядів (РЛС БО) можуть вирішувати найрізноманітніші завдання. Зокрема, РЛС БО, що працює на сантиметрових хвилях, успішно використовують для картографування місцевості, визначення вологості ґрунтів, меж танення снігів, визначення фаз вегетації рослинності, складання карт сільськогосподарського землекористування.

Завдяки винятковій оперативності методу РЛ-знімання, зумовленої її "всепогодною" придатністю, і високій якості РЛ-зображень. РЛ-знімання отримало широке застосування під час оперативних льодових розвідок на арктичних морських шляхах (РЛ БО "Торос").

Антени РЛ БО, які встановлюють на фюзеляжах літаків, завдяки їхнім великим розмірам, формують вузьку діаграму спрямованості у напрямі, перпендикулярному до подовжньої осі літака, що забезпечує високу роздільну здатність по лінії

шляху, яка дорівнює 40 м на ближньому плані і 100 м на тильному плані. Роздільна здатність РЛС БО за дальністю залежить, головно, від тривалості зондуючого імпульсу генератора і для станцій, які застосовують під час льодової розвідки, дорівнює 30–50 м.

Результати проведених досліджень застосування активних радіометодів у географічних дослідженнях показали, що радіотехнічні засоби, встановлені на літаках, супутниках і орбітальних станціях, можуть дати багато цінної інформації, а вдосконалення радіотехнічної апаратури і методики інтерпретації зображень розширить змогу використання цього методу для різних географічних досліджень.

***Радарна інтерферометрія***

Найбільшою натуральною перешкодою під час знімання у видимому (зоровому) діапазоні є хмарність. Тому аерознімання (фото чи цифрове) можна проводити лише за добрих погодних умов, а космічне знімання в цьому діапазоні взагалі в такий спосіб майже не регулюється, через що на багатьох знімках частина поверхні Землі закрита хмарами.

Радіодіапазон є прозорим для хмар і тому віддавна приваблював спеціалістів. Перші радари використовувались ще у 40–50-х рр., але в основному лише для навігації літаків та морських суден (через невисоку точність).

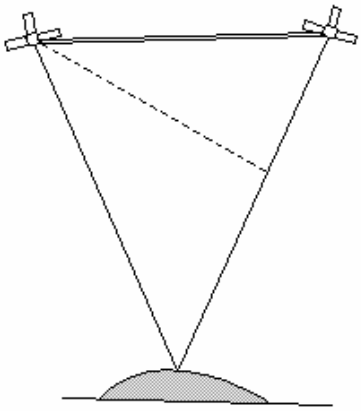


Рис. 3.34. Геометрична схема інтерферометрії з двох орбіт.

Використання радарів з т.зв. синтезованою апертурою суттєво вплинуло на якість отримуваних зображень. Найбільш привабливою є радарна інтерферометрія (від англ. InSAR: Interferometry Syntesic Aperture Radar). Суть її полягає у вловлюванні двох відбитих сигналів від об’єкта місцевості під час знімання з двох супутників та накладання їхніх радіочастот (рис. 3.34).

Фази Y1 і Y2 відбитих сигналів залежать від віддалей R1 та R2. Якщо зафіксувати різниці фаз, то

можна обчислити різницю віддалей R1 та R2, і згодом отримати просторовий образ об'єкта. Накладання відбитих сигналів з різницею фаз творить інтерферограму, яку пізніше опрацьовують комп'ютерним шляхом.

Надзвичайно цікавою і важливою є реалізація проекту топографічного вивчення Землі з використанням космічної радарної інтерферометрії, яка здійснилась 11–20 лютого 2001 року за допомогою шатла Endeavour. Автори і реалізатори проекту: NASA (США), NIMA (Національне картографічне агенство, США), ASI (Космічне агенство Італії), DLR (Німецький центр космічних досліджень). Політ тривав біля 100 годин, висота орбіти становила 233 км. За цей час було відзнято майже 95% земної поверхні. Геометрична точність знімання в плані становить 15–20 м, по висоті 6–16 м в залежності від спектрального діапазону знімання. Роздільна здатність становить 30×30 метрів.

***Лазерне сканування місцевості***

Цей метод дозволяє будувати цифрову модель місцевості. Базується на лазерному вимірюванні віддалі від приладу (встановленому на літаку чи супутнику) до точки місцевості. Фактично це система приладів, встановлених на носіях апаратури і на землі, а також відповідне програмне забезпечення.

На борту носія встановлюють потужний лазерний віддалемір, бортову GPS, інерціальну навігаційну систему (ІНС), відеокамеру, блок сканування, блок реєстрації даних. На землі встановлюють наземну GPS та робочу станцію для опрацювання даних, отриманих в польоті, та створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР).

Найчастіше використовують лазерний віддалемір, що працює в інфрачервоному діапазоні і висилає імпульси з частотою кілька тисяч на секунду. Блок сканування відхиляє промені перпендикулярно до лінії польоту, а за рахунок переміщення літака отримують сукупність відзнятих смуг. Точність вимірювання віддалі складає 1 см.

Інтегрований комплекс GPS-ІНС дає координатну прив'язку.

Синхронно з лазерним сканером працює відеокамера, скерована вздовж надирного променя. Вона захоплює і знімає всю смугу сканування. Часом встановлюють ще одну камеру, скеровану під кутом 45° вперед, яка дає перспективне зображення земної поверхні.

Поєднана обробка всіх даних (лазера, GPS, ІНС) дозволяє створити цифрову модель рельєфу як сукупність точок, від яких відбився лазерний промінь. Кількість точок складає до 100 000 на 1 км$^2$, точність фіксації висот становить 15–25 см для відкритих рівнинних територій, і 50–70 см – для гірських. Швидкість лазерного сканування поверхні орієнтовно становить 100 км$^2$ за одну годину польоту літака.

Лазерне сканування вже вийшло зі стадії експерименту. Його застосовують в практиці для просторового моделювання забудованих територій, інвентаризації доріг, ліній електропередач та ін.

Особливості лазерного методу знімання, що відрізняє його від інших видів знімань, такі:

– оскільки лазер є активним джерелом випромінювання, то результат не залежить від натуральної освітленості поверхні та від погоди; для сканування не є перешкодою також і рослинність;

– точність побудови ЦМР є досить високою, а час отримання кінцевого продукту – ЦМР досить коротким і може складати 2–3 дні після польоту;

– з результатів сканування можна отримати просторову модель об'єктів, наприклад, модель забудови міст;

– кошти на побудову ЦМР є менші, ніж під час використання інших способів, в т. ч. традиційного фотограмметричного.

Недоліком способу є те, що під час створення ортофотокарт необхідно додатково проводити аерофотознімання.

### *3.3.2. Класифікація за технічними засобами знімання*

Знімальну апаратуру, здебільшого, розробляли для розширення можливостей сприйняття інформації, яку отримують органи чуття людини, а згодом – для пошуку та реєстрації нових, недоступних для органів чуття потоків інформації. Такі пошуки тривають.

У зоровому діапазоні працюють всі види фото- та телевізійних камер. Деякі з цих апаратів виходять за межі зорового діапазону.

За межі зорового та оптичного діапазонів виходять знімальні апарати, які можуть сприймати та перетворювати випромінювання Землі в радіодіапазоні.

Головними технічними засобами ДЗЗ є:

- носії знімальної апаратури[23]

[23] Розділ 1.3.

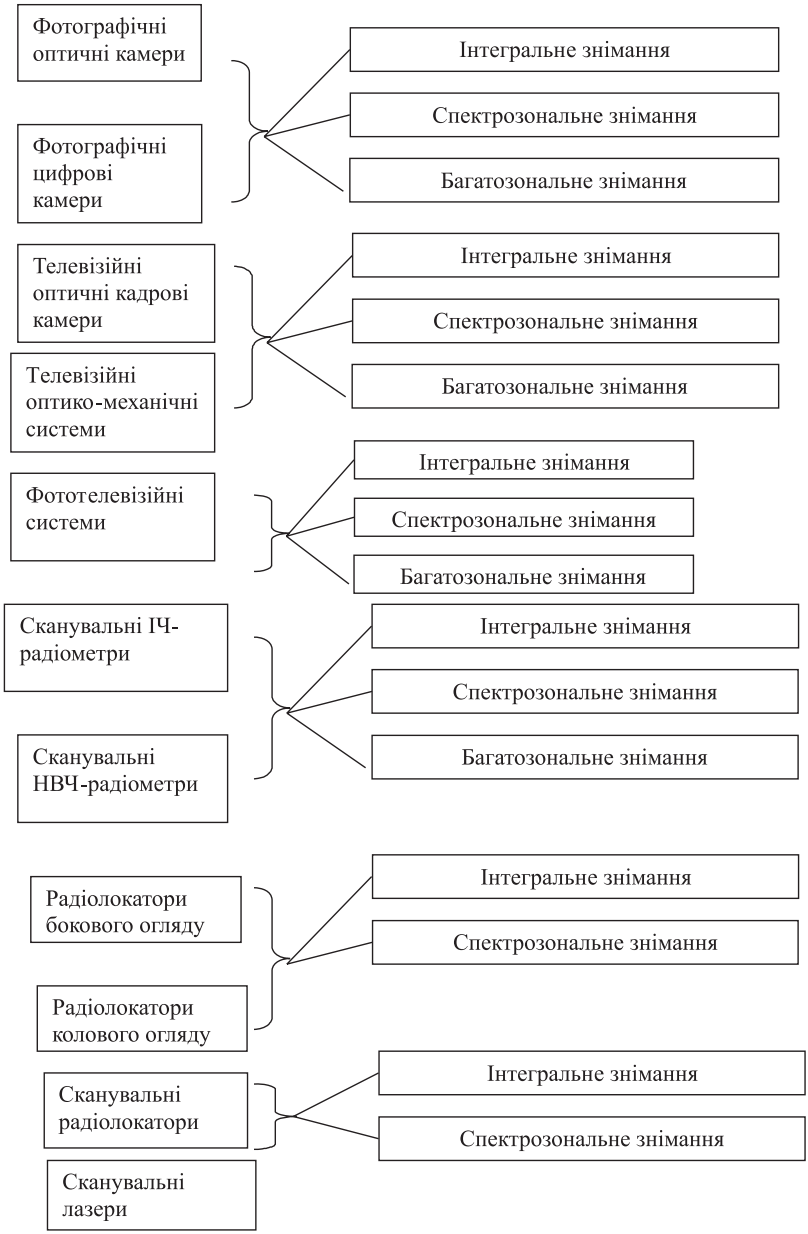



Рис. 3.35. Класифікація апаратури, яку використовують для дистанційного зондування Землі.

- знімальна апаратура (рис. 3.29)[24]
- апаратура для реєстрування та нагромадження інформації[25]
- апаратура передачі інформації[26].

Характеристику апаратури подано у відповідних підрозділах посібника, а в цьому підрозділі зазначимо лише їхні класифікаційні ознаки, що визначають характер знімання і матеріал знімання, залежні від апаратури (рис. 3.35).

### *3.3.3. Види знімань за масштабами*

Масштаб (мірило) знімка належить до одних з найважливіших параметрів, які характеризують інформацію зображення. Діапазон масштабів знімків великий і може змінюватися в сотні і мільйони разів: від зображень, де розрізняються елементи рослин до зображення всієї земної кулі. Стосовно масштабу знімки поділяють на такі класи (табл. 3.5):

*Таблиця 3.5*

Класифікація масштабів знімків [51]

| Назва масштабу | Числовий масштаб | |
|---|---|---|
| | аерознімків | космічних знімків |
| Великий | 1 : 1000 | 1 : 100 000 |
| Середній | 1 : 10 000 | 1 : 1000 000 |
| Дрібний | 1 : 100 000 | 1 : 10 000 000 |

Варто зазначити, що знімання майже не виконується з дотриманням поданих у таблиці масштабів. Знімки бувають найрізноманітніших проміжних (поміж названих) масштабів. Значно поширені знімання в діапазоні середніх масштабів. Наголосимо також, що в процесі знімання масштаб знімка постійно змінюється, бо залежить від багатьох чинників.

Чим дальше від Землі літає носій знімальної апаратури (порівнюємо однакові знімальні апарати), тим дрібніший масштаб знімків отримуємо. Якщо супутник має колову орбіту, за якої віддаль від Землі зберігається однаковою, а масштаб знімків зберігається приблизно однаковим. На еліптичних орбітах масштаб знімків

---

[24] Розділ 1.4.
[25] 1.4.
[26] 1.4.

безперервно здрібнюється на відрізку орбіти з віддаленням від Землі і збільшується на зворотному відрізку – під час наближення до Землі. Для географічних досліджень використовуються здебільшого колові орбіти.

Масштаб залежить також від фокусної віддалі об'єктивів знімальних апаратів (див. п. 4.5.1). Вона може змінюватися в десятки разів. Відомо, що чим довший фокус об'єктива (від звичайного фотоапаратного до телескопічного), тим більше зображення об'єктів можна отримати. При цьому потрібно також враховувати, що зі збільшенням фокусної віддалі зменшується кут огляду об'єктива. При малих кутах огляду масштаб в межах площини знімка залишається відносно стабільним. При збільшенні кута огляду об'єктива до середньокутних зростають різниці між віддаллю від знімального апарата до центра знімка і віддаллю від апарата до об'єктів, що зобразились на периферійних частинах знімка. Під час застосування ширококутних об'єктивів зазначена різниця віддалей прогресує швидше, бо відстань до периферійних об'єктів зростатиме ще й через вплив "кривизни Землі", тобто опуклості Земної кулі, яка виразніше проявляється при розширенні поля зору об'єктива. Для обох зазначених умов підходить подана вище формула, що описуватиме здрібнення масштабу на окраїнних частинах знімка порівняно з центральною його частиною.

Якщо в межі одного знімка потрапляють гори і передгірні низовини та височини, то варто сподіватися, що елементи зображення гір матимуть збільшений масштаб порівняно з прилеглими нижчими територіями.

Не вдається уникнути спотворень масштабу через вплив атмосфери на проходження світлових променів та від спотворень радіосигналу під час передачі його на наземні приймальні станції по радіоканалах.

Стабільність масштабу знімка по його площині залежні також від типів знімальної апаратури, способу формування зображення на світлочутливих матрицях та матеріалах, а також від кута відхилення візирної осі об'єктива від напрямку надиру (здрібнення масштабу наростає в бік відхилення візирної осі).

Зміна масштабу в межах знімка залежить також від способу формування зображення на світлочутливих приймачах. Якщо

зображення кадра знімка формується об'єктивом з пелюстковим замком діафрагми, що відкривається від центра до периферії, та у разі застосування знімальних камер з шторно-щілинним замком відкривання об'єктива, то масштаб буде змінюватися від центра до периферії, що є залежним лише від досконалості підбору оптичних лінз в конструкції об'єктивів. У разі застосування сканерних знімальних пристроїв масштаб зображення буде здрібнюватися від центральної лінії по трасі польоту апарата (так званої лінії нульових спотворень) до бокових граней знімка.

З огляду на зазначене під час дешифрування знімків часто виникає потреба визначення масштабів зображення в різних частинах знімків, і зробити це потрібно шляхом порівняння з точними картами в рівновеликих топографічних проекціях.

Вибір масштабу знімання здійснюють залежно від мети і можливостей технічного забезпечення. Для отримання зображень глобального характеру використовують знімання з високоорбітальних супутників з висотою орбіти близько 30–40 тис. км. Таке наддрібномасштабне зображення Землі було отримане з міжпланетних космічних апаратів ("Зонд-7" з віддалі близько 70 тис. км та з орбіти навколо Місяця (масштаб 1: 175 000 000). На знімку видно всю півкулю Землі. Для метеорологічного та синоптичного аналізу знімання здійснюється з висот 600–1 500 км. На знімках з цієї висоти добре зображається розташування хмарних систем, атмосферних фронтів, читаються напрями їхнього пересування.

Для вирішення задач, які потребують детального зображення наземних об'єктів, знімання виконується з низьких орбіт з висотами 150–450 км, на яких літають і супутники, і пілотовані космічні кораблі і космічні станції. З цих самих орбіт за допомогою довгофокусних камер можна отримувати зображення з розділенням об'єктів розміром менше ніж 1 м.

### *3.3.4. Інші види знімань*

***За принципами організації (програмою) знімання*** може бути *систематичним* (безперервним), чи перервним і *програмно регульованим* (програмованим).

Стосовно покриття поверхні Землі знімками розділяють на *маршрутне* (за завданими смугами та трасами) та *площинне* (покриття знімками великих територій без розривів поміж знятими смугами).

Маршрутне знімання здійснюють з літаків за замовленими маршрутами (вздовж рік, доріг, трас трубопроводів чи ліній електропередач) з виконанням знімань, придатних для стереоскопічного чи стереометричного опрацювання. Для цього кожен кадр знімка повинен перекривати сусідній на 60%. Маршрутне знімання з космічних апаратів може здійснюватися вздовж траси польоту супутника з постійним чи переривчастим включенням знімальних апаратів.

Площинне знімання виконують для невеликих ділянок землі, яке здійснюють з літаків. При цьому паралельні маршрути літаків прокладають так, щоб кожен новий маршрут давав змогу перекрити знімками попередній маршрут на 30% ширини. Для картографічного знімання маршрути, зазвичай, прокладають вздовж паралелей із заходу на схід. Площинне знімання з космічних носіїв здійснюють так, щоб міжобертові зсуви орбіти перекрити застосуванням ширококутних об'єктивів, або продовженням тривалості знімання на такий час, щоб міждобові зсуви орбіти забезпечили повне покриття знімками потрібного обширу території. В середньому, для одноразового знімання всієї (в межах широт нахилу орбіти) поверхні Землі (разом з хмарами) з низьких орбіт потрібно 15–18 діб.

Програма знімання формується залежно від потреб чи поставлених наукових та практичних завдань, від наявного типу апаратури, змоги надійного забезпечення процесу знімання фотоматеріалами, запасів пам'яті реєстраторів знімання, резерву електроживлення апаратури, можливості передачі чи спуску результатів знімання на Землю, а тому може бути найрізноманітнішою.

***За метою знімання*** може поділятися на *моніторингове*, *розвідувальне*, *очікувальне* на певні ефекти, наприклад, грози, тайфуни, аномальну радіоактивність, сигнали SOS[27] і т. п. Значну кількість знімань виконують з метою дослідження природних ресурсів, тематичного картографування (метеорологічного, геологічного, лісівничого, сільськогосподарського тощо).

Програма знімання формується також залежно від способу управління знімальною апаратурою – автоматичного, чи ману-

[27] Сигнал біди – "рятуйте наші душі", який повинні подавати кораблі, літаки, дрейфуючі станції у випадку катастрофічних ситуацій.

ального (ручного) – відповідно до осмислення прийняття рішення оператором пілотованого носія апаратури (літака, космічного корабля). На носіях знімальної апаратури зі змогою автоматизованого управління знімальним процесом керують запрограмовані пристрої управління, які активізують знімання постійне, або залежне від часу польоту (завданого часового інтервалу), координатів підсупутникових пунктів, закритості Землі хмарами, пролітання над сушею чи океанами, від часу доби (ніч, день) на трасі орбіти.

***Поділ знімання за кутом візіювання об'єктів місцевості.*** Космічне знімання інформації, як і аерознімання, може виконуватися при різних положеннях оптичної осі апаратури стосовно до площини знімання: вертикально, чи під різними кутами до неї. Залежно від цього розрізняють *планове, перспективне, планово-перспективне і панорамне знімання*.

Головним із зазначених видів є *планове знімання*. Для його виконання космічний апарат повинен бути над об'єктом знімання в такій позиції, щоб оптична вісь об'єктива знімального апарата збігалася з напрямом місцевої вертикалі. При певних завданнях допускається відхилення не більш ніж на 3–5°. Визначення місцевої вертикалі виконується на бортах носіїв знімальної апаратури за допомогою оптико-електронних давачів з достатньо високою точністю.

Масштаб зображення на плановому знімку майже однаковий у всіх його частинах[28], спотворення різного походження також мінімальні, а тому планове знімання використовують у тих випадках, коли необхідно отримати точні геометричні характеристики об'єктів, що знімають, наприклад для створення і корекції карт.

*Перспективним фотографуванням* називається таке, за якого оптична вісь фотоапарата відхиляється місцевої вертикалі більш ніж на 5°. Перспективний знімок за своїми зображувальними властивостями наближається до побутових фотографій земної

---

[28] Зміна масштабу планових знімків залежить від типу знімального апарата, висоти знімання, кута огляду об'єктива, кривизни Землі, перевищень на поверхні в межах знімання, впливу атмосфери та ін. чинників.

поверхні, зроблених з веж чи інших високо розташованих пунктів знімання. Для цих знімків характерне специфічне охоплення знімальної поверхні: на прямокутному кадрі знімка зображається простір земної поверхні у формі трапеції, причому коротка її основа є ближчою до знімального апарата, а довга – далекою (навіть до горизонту). З огляду на це в межах знімка змінюється масштаб: найбільшим він є при короткій стороні трапеції (ближчі об'єкти), а найдрібнішим – при довгій – на віддалених об'єктах. Для проведення точних вимірювальних робіт такий знімок не придатний, але для інших цілей його застосовують досить часто.

Оптимальна перспективність космічних знімків отримується при куті відхилення оптичної осі від напряму місцевої вертикалі рівному 45°. У цьому випадку масштаб фотознімка для переднього і заднього планів буде відрізнятися.

Незначну різномасштабність зображення на перспективних знімках вони успішно використовуються для дешифрування, особливо в тих випадках, коли фотографування ведеться з метою льодової і метеорологічної розвідок, тобто тоді, коли необхідний сам факт визначення певних пошукових об'єктів знімання.

*Планово-перспективне* космічне знімання здійснюють у тому випадку, якщо на борту космічного корабля наявні не менше трьох знімальних камер: дві з яких виконують (бокове) перспективне знімання, а центральна камера – планове. Цей вид зйомки дає змогу одночасно отримувати планові знімки для цілей картографування і перспективні – для виконання різних досліджень.

*Панорамне знімання* здійснюється камерою, в якій є об'єктив з широким кутом огляду (типу "риб'яче око"), або пристосування для поворотного руху об'єктива в одній площині (фотоапарат "Горизонт"), або ж цей об'єктив має здатність "гойдатися" в площині, перпендикулярній до напряму руху носія апаратури. Зображення місцевості на носіях зображення в такій апаратурі будується шляхом послідовного переміщення фокусу об'єктива вздовж фотофіксаторів (фотоплівок пластинок з фоторезисторами тощо), що формують кадри чи смуги запису зображення.

Панорамне знімання дає змогу охопити значно більшу площу території під час фотографування з одного носія, ніж планове знімання, а також легше зменшити спотворення зображення, що

виникає через зміну відстаней до об'єктів знімання в центрі і на краях смуги знімання.

З усіх розглянутих способів фотографування найбільш продуктивним є плановий, оскільки він забезпечує високу точність картографування в різних масштабах за порівняно простої фотограмметричної обробки знімків.

## 3.4. Апаратура дистанційного знімання

Якість та специфіка знімків ДЗЗ за сприятливих станів атмосфери залежна від якості знімальної апаратури. Виведення супутника Землі разом зі знімальною апаратурою на орбіту є операцією складною та дорогою, а тому апаратура, і системи виведення мають бути досконалими і безвідмовними. Знімальні системи, які використовують в аерокосмічних методах, повинні забезпечити отримання знімків, придатних для візуального дешифрування, геометричних і фотометричних вимірювань та автоматизованої комп'ютерної обробки.

Для практики потрібні такі знімки, які задовольняли б вимоги конкретних замовників та "попутних" різноманітних користувачів, причому може виявитися, що потреби різних користувачів є суперечливими. З огляду на це на одному носію встановлюють комплект з різної апаратури, який дасть змогу отримати знімки різних масштабів, роздільної здатності та площі охоплення території. Крім того в комплекті апаратури повинні бути знімальні системи, пристосовані для роботи в умовах ночі, суцільної хмарності, або в інших несприятливих обставинах (наприклад, розрахованих на роботу в умовах вібрації літаків під час польоту, і перевантажень, що виникають під час виведення на орбіту ШСЗ). У комплект знімальної апаратури повинні входити знімальні системи, які частково дублюють і доповнюють одна одну, виконують синхронне знімання одних і тих самих об'єктів у світлових, теплових, та радіохвилях.

Серед знімальних систем значно поширеними є світлографічні (фотографічні) системи, тобто системи оптичного діапазону, до яких належать фотоапарати, телевізійні апарати та сканери. За

принципами формування зображення їх можна поділити на апарати одномоментного отримання всього кадру знімка, апарати послідовного формування зображення з паралельних лінійок (вузьких смуг, рядків), апарати, які утворюють зображення знімка з окремих елементарних ділянок (елементів зображення) – пікселів.

### *3.4.1. Кадрові фотографічні камери*

Чільне місце серед фотографічних камер для знімання з літаків і космосу в XX ст. посідають аерофотоапарати, як одна з найдосконаліших систем, що створює зображення, близьке до зорового сприйняття об'єктів людиною, що забезпечує високу тональну та геометричну точність.

*Аерофотоапарат*. Для повітряного знімання (аерофотознімання) використовують аерофотоапарати різних конструкцій і призначень.

*За призначенням* аерофотоапарати ділять на *топографічні*, призначені для отримання знімків з високоякісними вимірювальними геометричними властивостями і *спеціальні* – для рекогносцирувальних завдань, пошукувальних робіт у різних наукових та практичних галузях.

*За конструкцією* аерофотоапарати (АФА) класифікують на кадрові, щілинні і панорамні. Для топографічних робіт застосовують *кадрові аерофотоапарати*. Значно поширений розмір їхнього кадру 18×18 см (за кордоном – 23×23 см), хоч іноді використовували аерофотоапарати з розміром кадру 6×8, 13×18, 30×30 см.

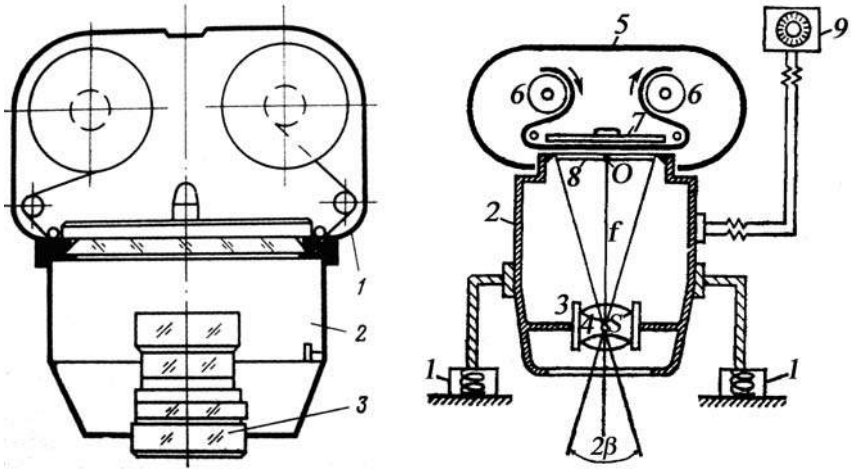
Тривалість експозиції освітлення фотографічного шару регулюється замком діафрагми. У картографічних аерофотоапаратах встановлюють центральні міжлінзові замки, які є діафрагмою, отвір в центрі якої швидко змінюється від відкривання на завданий діаметр до повного закриття. Головна перевага центрального замка – одночасне експонування всіх точок кадру. За допомогою центральних замків лише частково вдається досягти дуже коротких витримок експозиції світлового експонування плівки чи інших світлочутливих пристроїв[29]. Замок іншого типу – шторно-щілинний – послідовно експонує кадр через вузьку щілину в

[29] Під час експонування кадру через замок такого типу пелюстки діафрагми повинні від стану закритого розійтися до заданого діаметра отвору, і знову замкнутися.

світлонепроникній шторці, яка пробігає вздовж світлочутливого шару. Цей принцип фотографування закладений у *"щілинних" аерофотоапаратах*. Аероплівка під час щілинного фотографування переміщується пропоційно швидкості польоту літака, а місцевість проектується на аероплівку через об'єктив і вузьку щілину шторки. За допомогою шторно-щілинних замків можна досягти коротких витримок експонування, наприклад 0,0005 с. Унаслідок знімання отримують аероплівку з нерозривним зображенням місцевості. Проте щілинним замкам властивий суттєвий недолік – спотворення геометричної форми об'єктів, що знімаються. У разі збігу напряму руху шторки і носія зображення на знімку буде дещо розтягнутим, якщо ж навпаки, – то стиснутим. Тому знімки, отримані аерофотоапаратами з шторно-щілинними замками, не використовують для точних фотограмметричних вимірювань під час топографічних чи картографічних робіт.

Крім кадрових і щілинних, для аерознімання місцевості з літаків застосовують також *панорамні аерофотоапарати*. Їхньою особливістю є те, що під час фотографування зображення будується на внутрішню поверхню циліндра, причому експонування виконують послідовним переміщенням вузької щілини, яка рухається разом з обертанням об'єктива. Інша перевага таких аерофотоапаратів перед кадровими полягає у високій роздільній здатності знімка, оскільки використовується тільки центральна частина поля зображення. Другою перевагою є широкий кут огляду земної поверхні (ширококутність (до 140–180°), який дає змогу знімати широку смугу місцевості. Недолік – труднощі при фотограмметричній обробці панорамних знімків, оскільки в межах кадру змінюється масштаб зображення. Панорамні знімки здебільшого використовують для розв'язання низки інженерних задач.

Основними складовими частинами аерофотоапарата є: об'єктив, діафрагма, світлонепроникна камера, касета з котушками фотоплівки, вирівнювальна пластина, прикладна рамка, пристрої управління (перетягуванням плівки, встановлення розміру отвору діафрагми, тривалістю експозиції, спусковим механізмом) (рис. 3.36). Фотоплівку затискають і вирівнюють у площині між вирівнювальною пластиною і прикладною рамкою за рахунок різниць тисків, який створюють нагнітанням повітря в камеру і його витягуванням через касету. Йдеться про те, що аерофотоплівка




*а* *б*

Рис. 3.36. Будова аерофотоапарата (АФА):
*а* – зовнішній вигляд: ***1*** – касета, ***2*** – корпус, ***3*** – об'єктив [68];
*б* – внутрішня будова: ***1*** – амортизаційний механізм і кріплення аерофотоапарата; ***2*** – корпус камери; ***3*** – об'єктив; ***4*** – замок діафрагми; ***5*** – касета; ***6*** – котушки; ***7*** – вирівнювальна пластина; ***8*** – прикладна рамка (скло); ***9*** –пристрій управління; ***S*** – центр проектування знімка, що співпадає з центром об'єктива; ***f*** – фокусна відстань камери – довжина перпендикуляра, опущеного з центра проектування на площину знімка; ***O*** – головний пункт знімка – основа перпендикуляра; ***β*** – кут поля зору об'єктива [101].

має значну ширину (8–18–30 см) і може легко деформуватися. Щонайменший відступ від площини прикладної рамки приводить до відчутних геометричних спотворень зображення.

Розміри світлового вікна в прикладній рамці визначають формат аерофотознімка. У площині прикладної рамки закріплені чотири фігурні пластини, які зображаються на краях аерофотознімка і є його координатними мітками. На склі прикладної рамки гравіюють контрольні мітки (хрестики), які утворюють сітку квадратів з кроком один або два сантиметри.

Якщо з'єднати прямими лініями мітки на протилежних кутах, то в перетині ліній отримаємо головний пункт знімка (*O*), який є початком прямокутних координат центру знімка. Координати контрольних міток визначають з точністю порядку 2–

3 мкм. Вони служать для врахування різних спотворень в межах аерофотознімка.

На літаку встановлюють спеціальне кріплення фотоапарата з амортизаторами, яке оберігає аерофотоапарат від вібрацій, забезпечує задане його положення: вертикальний напрямок оптичної осі під час планової зйомки і похилий – під час перспективної. Для стабілізації заданої позиції аерофотоапарата і зменшення неминучого нахилу планових знімків застосовують гіростабілізаційні пристрої[30]. Під час роботи на великих висотах аерофотоапарат ізолюють від зовнішнього середовища, а знімання ведуть через ілюмінатор[31]. Крім того в умовах надмірного холоду у фотоапаратах використовують підігрів, який нормалізує гнучкість та міцність фотоплівки, належну динаміку всіх рухомих частин камери і касети

Процес аерофотознімання, зазвичай, супроводжується визначенням просторового положення літака в моменти фотографування. Для цього в комплекті з аерофотоапаратами використовують радіовисотомір для визначення дійсної висоти польоту літака і диференціальний барометр-висотомір (статоскоп) для точного вимірювання зміни висоти польоту в моменти фотографування, а також радіогеодезичну апаратуру для отримання планових координат літака. Для радіогеодезичного визначення положення літака використовують систему GPS, або в районі знімання розташовують три спеціальних наземних радіостанції, які працюють спільно з літаковою і дають змогу вимірювати відстані між літаком і наземними станціями в моменти фотографування.

Для управління і контролю за роботою аерофотоапарата та синхронізацією його роботи з додатковими пристроями (радіовисотоміром, статоскопом, радіогеодезичною апаратурою і радіотехнічною станцією) аерофотоапарат підключають до командного пристрою. Він має механічний, електромеханічний чи електронний інтервалометр (реле часу), що визначає заданий інтервал часу між знімками,

---

[30] Гіростабілізація – дотримання певної позиції тіла, яка забезпечується швидкими обертами маховика. Такий принцип працює в дзизі, колесах велосипеда та мотоцикла, забезпечує стабілізацію гармати танка при стрільбі в час руху по нерівній поверхні.

[31] Ілюмінатор – вікно з товстим, але прозорим склом (на літаках, кораблях морських та космічних).

який встановлюється залежно від умов знімання – висоти фотографування, швидкості польоту, параметрів аерофотоапарата. Останні конструкції електронних командних пристроїв дають змогу автоматично, відповідно до змін режиму польоту, змінювати інтервал знімання.

Рис. 3.37. Мультиспектральна камера модель 10 (Prospekt Spektral Data) [68].

Всі аерофотоапарати *за ступенем автоматизації робіт* поділяють на автомати, напівавтомати і не автомати. У топографічній практиці знаходять застосування винятково автоматичні стаціонарні аерофотоапарати, але деякі малогабаритні і ручні апарати можуть працювати в напівавтоматичному і ручному режимах. Живлення електричних систем аерофотоапарата здійснюється від загальної літакової мережі.

*За кількістю об'єктивів* аерофотоапарати можуть бути *однооб'єктивні* і *багатооб'єктивні*. Багатооб'єктивні фотоапарати для інтегрального знімання витісняються ширококутними та панорамними фотоапаратами або заміняються комплектами для багатозонального знімання (рис. 3.37).

*Об'єктиви* сучасних аерофотоапаратів є складними багатолінзовими системами, які забезпечують правильне зменшене зображення об'єктів, що потрапляють в їхнє поле зору. Кількість лінз в апараті 10–15, що необхідно для усунення різних спотворень (рис. 3.38).

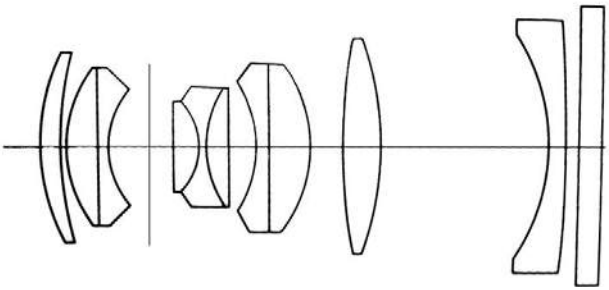


Рис. 3.38. Схема лінз подвійного об'єктива Гауса.

Головними характеристиками об'єктивів є: фокусна відстань, кут поля зору, відносний отвір і світлосила, роздільна здатність, ортоскопічність (здатність подачі неспотвореного зображення), світлопропускання, світлорозподіл. Найважливіші з них розглянемо далі.

В аерофотоапаратах встановлюють об'єктиви з різною фокусною відстанню (*f*). Об'єктиви з фокусною відстанню до 100 мм називають *короткофокусними*. Вони дають змогу отримувати знімки, придатні для високоточного зображення рельєфу рівнинної і горбистої місцевості, які застосовують в аерофототопографії. Об'єктиви з фокусною відстанню більше ніж 140 мм належать до довгофокусних. Їх використовують для знімань гірських районів, оскільки дають малі спотворення через вплив рельєфу на знімках. Довгофокусні об'єктиви з фокусною відстанню більше 500 мм належать до розряду телеоб'єктивів. Вони зручні для знімань з дуже великих висот (рис. 3.39).

З фокусною відстанню пов'язаний кут поля зображення об'єктива (2ω), який визначають як кут між напрямами на кути

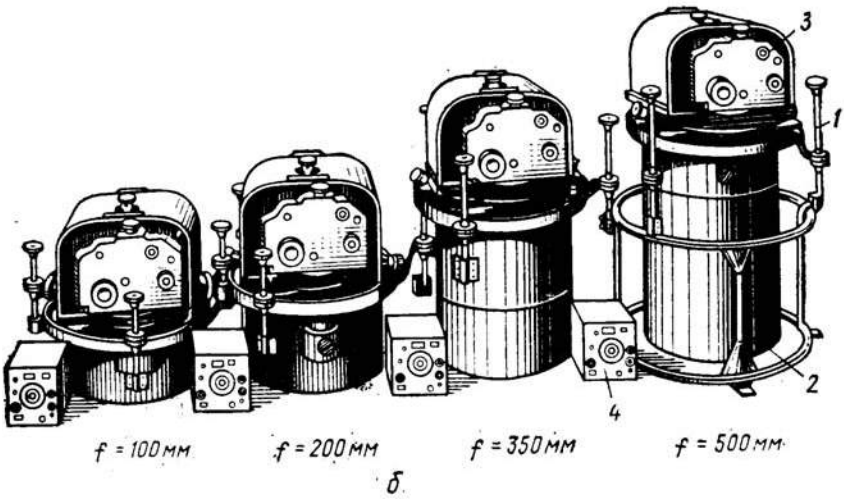



Рис. 3.39. Аерофотоапарати АФА з різною фокусною віддаллю відрізняються розмірами об'єктивів
(1 – пристрій кріплення аерофотоапарата (з амортизаторами) в літаку; 2 – корпус аерофотоапарата з об'єктивом; 3 – касета з аерофотоплівкою та вирівнюючим пристроєм; 4 – командний прилад для управління аерофотоапаратом) [14].

кадру. Залежно від кута поля зображення аерофотоапарати поділяють на: вузькокутні (2ω >50°), нормальнокутні (50°<2 ω <80°), ширококутні (80°<2 ω <110°) і надширококутні (2 ω >110°) (рис. 3.40).

Кут огляду і поле зору (при однаковій висоті польоту) зростають зі скороченням фокусної віддалі фотоапаратів (рис. 3.41).

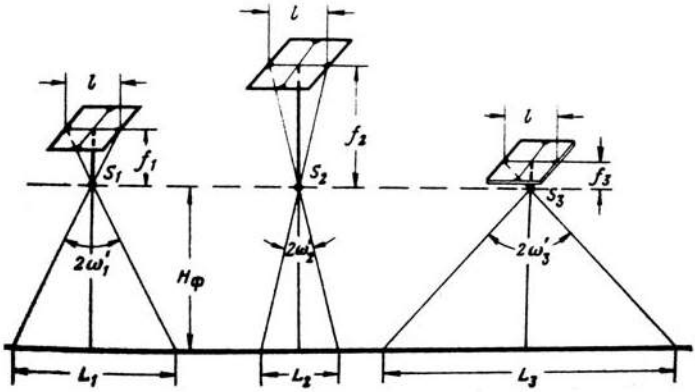



Рис. 3.40. Зміна розміру (*L*) місцевості, що потрапляє в поле зору АФА з різними кутами огляду об'єктивів.

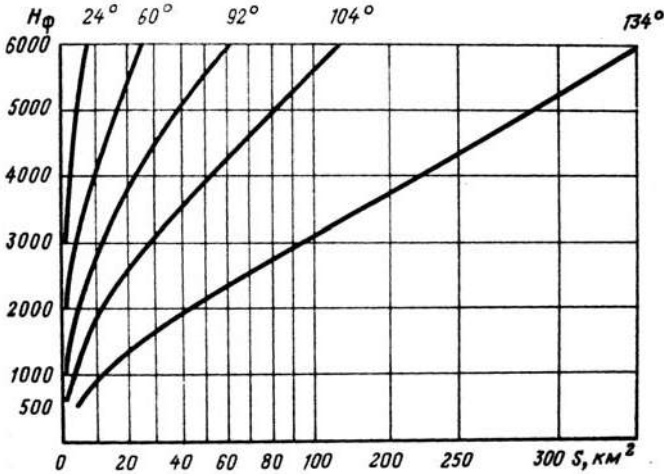



Рис. 3.41. Номограма залежності кута поля зору АФА (ф) і площі охоплення одним знімком земної поверхні (s) при різних висотах польоту (Н) носія [69].

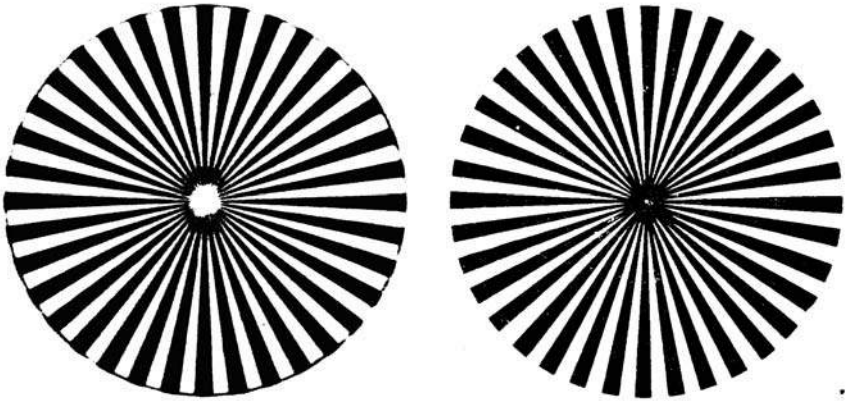


Рис. 3.42. Різні види аберацій (сферична й астигматична) одного і того ж фотооб'єктива, що проявилися під час перефотографовування зображення міри за різного освітлення.

*Роздільну здатність фотооб'єктива* оцінюють числом окремо впізнаваних (розрізнених) ліній в одному міліметрі зображення спеціального тест-об'єкта, або *міри* (лін/мм, або мм$^{-1}$). Для короткофокусних об'єктивів топографічних аерофотоапаратів роздільна здатність коливається від 35 мм$^{-1}$ в центрі до 12 мм$^{-1}$ на краях зображення; для довгофокусних об'єктивів – від 50 мм$^{-1}$ до 20 мм$^{-1}$. На роздільну здатність негатива впливає фотографічна система "об'єктив – фотоплівка", а також контрастність об'єкта, який фотографується, через що роздільна здатність реального негатива буде нижчою від роздільної здатності об'єктива і плівки й становитиме від 8 до 18 мм$^{-1}$. Роздільна здатність надрукованих на папері знімків буде ще нижчою – 7–12 мм$^{-1}$.

Окрім роздільної здатності фотооб'єктива, на якість зображення впливають різні аберації[32], властиві оптичним системам. *Сферична аберація* викликає розпливчасте, зачорнене або вибілене зображення поблизу оптичної осі (в центрі знімка – рис. 3.42). Її можна звести до нуля підбором лінз. *Хроматична аберація* – спотворення кольорів, що виникає під час проходження хвиль, що відповідають різним кольорам, через лінзи об'єктива а також через різні їх кути заломлення на поверхнях лінз. *Астигматична*

[32] Аберація – відхилення, неточності, помилки.

*аберація* – це таке спотворення, коли оптична система будує зображення пункту, як овал, чи складну геометричну фігуру. Виникає при незадовільному центруванні лінз об'єктива. Об'єктиви без астигматичної аберації називають анастигматами. Більшість аберацій об'єктивів можна звести до мінімуму шляхом застосування для виготовлення лінз спеціального оптичного скла (чистого й однорідного), ретельного підбору кривизни і шліфування поверхонь лінз та юстування (точного встановлення і центрування) лінз об'єктива.[33]

Додатковими до фотооб'єктивів пристосуваннями служать *світлофільтри.* Їх використовують тоді, коли потрібно компенсувати повітряну димку, або підсилити чи обмежити доступ до об'єктива і плівки певних довжин хвиль. Світлофільтри встановлюються перед об'єктивом.

Світлофільтром називають середовище (зазвичай, додаткова скляна плоскопаралельна пластина з певним забарвленням), що поглинає (відфільтровує) світлові промені певної довжини, а інші – пропускає. Шляхом підбору світлофільтрів та фотоплівок, які мають неоднакову чутливість у різних ділянках оптичного спектру можна отримати спеціальні ефекти, наприклад, фотографування у діапазоні хвиль певної довжини (спектрозональні фотографії[34]).

"Замок" ("затвор") фотоапарата служить для дозованого пропускання світла через об'єктив до фоточутливого елемента (плівки, чи матриці). В автоматичних камерах він має бути підключеним до експонометра. Від конструкції замків фотоапарата залежить якість освітлення площини фотокадра, тобто змога правильної передачі фототонів, а також – об'єктивність їхніх вимірювань на негативах і позитивах фотографічного зображення. За розташуванням в оптичній системі фотоапарата замки можуть бути міжлінзові і позалінзові (розташовані між об'єктивом і світлоприймачем (плівкою, матрицею). За конструктивними особливостями замки можуть бути: центральні пелюсткові, жалюзеві, щілинні і обтюраторні[35]. Така різноманітність замків (закривок) зумовлена їхньою

[33] Усі види аберацій характерні для побутових оптичних і цифрових фотоапаратів –"мильниць" з пластмасовою оптикою.

[34] Опис – в розділі "Види знімання".

[35] Обтюратори – обертова пластина, що періодично перекриває світловий потік.

важливістю для правильного формування кадру і складністю їхньої роботи, зумовленої потребою миттєвого безінерційного і надійного спрацювання. Через це замки “тренують” і тарують.

Фотокамери АФА є різних модифікацій і, відповідно, різного призначення. Особливою точністю зображення з правильною передачею кутів, довжин ліній та площ відзначаються камери знімання з метою створення та оновлення топографічних карт.

Широкого застосування набули камери серії КАТЕ (російська абревіатура КАТЭ – “комплекс аэротопографический”) і серед них КАТЕ-140, яка успішно застосовується для фотографування земної поверхні із космічних носіїв.

Зокрема, вимірювальні властивості космічних негативів, отримані камерою КАТЭ-140 (табл. 3.1), дають змогу визначати координати пунктів з середньою квадратичною помилкою ±10 мкм в масштабі зображення. Фотографування топографічною космічною знімальною камерою КАТЭ-140 може виконуватися або одиночними кадрами, а при автоматичному зніманні з наперед завданим інтервалом та з перекриттям кадрів для забезпечення стереоскопічного ефекту. Як і всі космічні фотокомплекси, камера КАТЭ-140 має електроуправління – всі операції, починаючи з перемотування плівки, зведення замка і закінчуючи командою на фотографування, регулюються електричними сигналами з командного пульта.

Космічні знімальні камери призначені для отримання знімків, які можуть використовувати для складання тематичних карт, чи фотопланів і виконання дешифрування знімків різного призначення. Зазвичай, ці знімальні камери мають великий діапазон фокусних відстаней (f = 30–500 мм) і великі розміри кадру. Особливістю камер КАТЕ є змога виконання планового, перспективного і панорамного фотографування.

У тих випадках, коли необхідно одночасно забезпечити великий кут огляду і високу роздільну здатність, використовують сканувальні (або панорамні) фотокамери. Панорамне фотографування здійснюється різними способами побудови зображення: а) повертанням об’єктива і напрямку візування стовно об’єкта знімання та поверхні плівки, б) повертанням вузького пучка променів з кута огляду об’єктива вздовж плівки, в) переміщенням плівки відповідно до швидкості польоту носія та ін. Кут поля зору

при цьому може досягати 140°. Розмір площі сканування за напрямком траєкторії польоту визначає довжину кадру, а упоперек – ширину. Компенсація деяких спотворень зображення можна досягати механічним способом – шляхом переміщення плівки з швидкістю, рівною швидкості переміщення зображення, або оптичним способом за допомогою спеціальних оптичних клинів, що провертаються перед об'єктивом камери.

*Фотоапарати для знімань з космосу* класифікують на напівавтоматизовані, які встановлюють на пілотованих космічних кораблях, і повні автомати для знімань з безпілотних космічних кораблів з подальшим поверненням знятої плівки на Землю. Тривалість функціонування фотоапаратури на орбіті визначається передусім запасом плівки, який не може бути надмірно великим. Як показують розрахунки, для знімання всієї поверхні Землі з роздільною здатністю 50 м потрібно майже 0,5 т фотоплівки. Це накладає певні обмеження на метод фотографування плівковими апаратами.

Для аеро- і космічного фотографічного знімання застосовують спеціальну автоматизовану *багатозональну фотокамеру МКФ-6*, яка має шість ідентичних об'єктивів з фокусною відстанню 125 мм і синхронно працюючими замками (рис. 3.43). Формат кадру 55×80 мм.

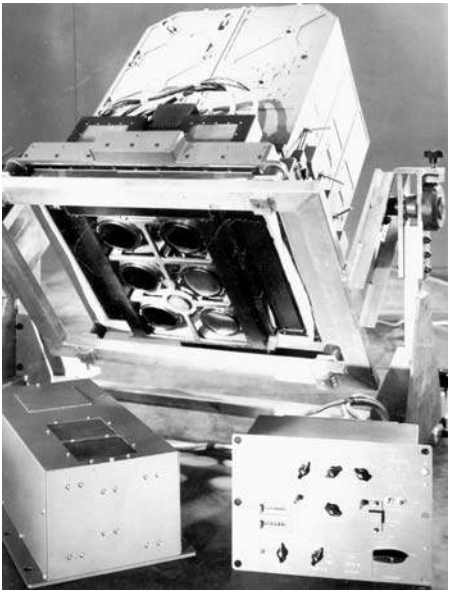


Рис. 3.43. Багатозональна фотографічна камера МКФ-6 спільного радянсько-німецького виробництва [32].

Кожен об'єктив забезпечений інтерференційним світлофільтром, який у поєднанні з плівкою різної спектральної чутливості забезпечує знімання в порівняно вузьких спектральних зонах: трьох інфрачервоних і трьох основних зонах видимого спектру (червоній, зеленій та синій). Знімки, отримані в названих за кольорами різ-

них довжинах хвиль, є чорно-білими, але їхній ступінь почорніння (фототони) відповідають інтенсивності випромінювання в певній ділянці спектру ЕМХ, що йде від Землі.

Кожен знімок можна використовувати окремо або в поєднанні з іншими знімками. Через кожне з цих зональних зображень можна (за допомогою пристроїв, подібних до звичайного фотопроектора) пропустити світло певного забарвлення та отримати однотонально забарвлене зображення. Якщо такі зображення однієї території з різних камер, зафарбовані світлом різних кольорів поєднати в одне зображення, то отримаємо зображення в штучних, синтезованих кольорах, що мають подібне, чи віддалене до натуральних кольорів зображення. Це, однак, не шкодить, а допомагає дешифруванню об'єктів[36].

Космічні фотографічні камери на даний час розташовані здебільшого на російських супутниках. Найбільш відомими з них є камери: багатозональна МК-4 з роздільною здатністю на поверхні Землі 8–10 м і площею кадру (Sк) 30 000 км$^2$; тризональна камера КАТЕ-200 з роздільною здатністю 20 м і Sк 50 000 км$^2$; чорно-біла двозональна КФА-1000 (відповідно 5 м і 6 400 км$^2$ ); чорно-біла КФА-3000 (роздільна здатність 2–3 м і Sк 440 км$^2$.

Під час знімання з носія, що швидко рухається вздовж поверхні Землі, зображення місцевості, сфокусоване на плівку, також не є стабільним. За час, визначений для світлової експозиції плівки, відбувається відповідний зсув зображення, який призводить до "змазу" – нерізкості зображення, значного погіршення його якості. Якщо зменшенням часу експонування не вдається зробити величину зсуву малою, то доводиться в конструкцію фотоапарата вводити пристрої для його компенсації. Нині поширені пристрої компенсації зсуву способом повороту проектувальних променів за допомогою призми (оптичного клину), що прокручується на відповідний кут (встановлюється перед об'єктивом), або повороту всього фотоапарата при експонуванні з швидкістю, що відповідає швидкості зсуву знімальної камери стосовно Землі. Так, камера МКФ-6 для компенсації зсуву під час експозиції автоматично коливається на невеликий кут, утримуючи "приціл" оптичної осі на певний пункт на земній поверхні.

---

[36] Детальніший опис пропонуємо в розділі "Перетворення дистанційних матеріалів".

Важливим елементом кожної фотографічної камери є фотографічна плівка. Детальнішу інформаціїю про властивості таких плівок подано в розділі 1.4. "Види дистанційного знімання".

### 3.4.2. Телевізійні (електронні) камери

Основною частиною знімальних телевізійних камер є спеціальні світлочутливі пластини, які перетворюють спроектоване на них світло в електричний сигнал. Найпоширенішими різновидами знімально-передавальних пристроїв є *дисектор і відикон* (рис. 3.44).

Передавальна телевізійна трубка типу *дисектор* (гр. "дисекто" – розтинаю) є найбільш вживаною у телевізійних знімальних камерах.

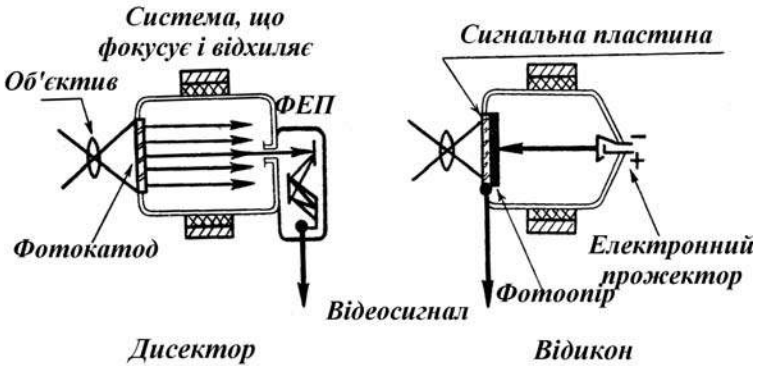



Рис. 3.44. Схеми знімальних передавальних телевізійних трубок типів дисектор і відикон [52]. ФЕП – фотоелектропомножувач.

Особливістю дисектора є низька чутливість – він працює тільки при яскравому освітленні, а тому його застосовують для глобальних знімань із супутників на геостаціонарних орбітах, для яких характерним є "зависання" над незмінним пунктом поверхні Землі і застосування більших фотоекспозицій[37].

У дисекторі оптичне зображення з об'єктива проектується на пластину, складену з фотокатодів. Зазначимо, що фотокатоди змінюють інтенсивність випуску електронів прямо пропорційно кількості світла. Зокрема, створюється "електронне зображення",

[37] Про особливості геостаціонарних орбіт – у розділі "Орбіти ШСЗ".

яке можна уявити собі як пластину з "фонтанами" електронів різної щільності та інтенсивності, що йдуть від елементарних ділянок пластини фотокатодів. За допомогою фокусуючо-відхиляючої системи ці "фонтани" потоків електронів з елементарних ділянок послідовно і почергово спрямовуються до вхідного отвору фотоелектронного помножувача (ФЕП), що виробляє сильніший електричний ряд відеосигналів[38], долучаючи до попереднього сигналу наступний. Унаслідок такої почергової "розгортки" двовимірне зображення пластини фотокатодів перетворюється в одновимірну функцію зміни напруги в часі, яку вже можна передати одним каналом зв'язку.

*Відикон* (лат. "відео" – дивлюся і грецьк. "іконос" – зображення) чутливіший тип передавальної телевізійної трубки. Світлочутливим екраном служать напівпровідникові і фотоелементи з внутрішнім фотоефектом. Це плоска поверхня балона трубки, який є прозорим для потрібного спектрального інтервалу ЕМХ і на який з одного боку напилено тонкий шар металу (десятки мільйонів зерен срібла чи золота) – фотомозаїка, а з другого – шар металевого провідника (сигнальна пластина).

Кожне окреме зерно стосовно аноду трубки є мікроскопічним катодом, а щодо сигнальної пластини – обкладкою мікроскопічного конденсатора. Якщо спроектувати через об'єктив зображення на світлочутливу поверхню фотомозаїки, то окремі її часточки – елементарні фотокатоди, які є слабо освітленими, втратять мало електронів (малий фотострум) і виявлять малий заряд елементарних конденсаторів. Сильно освітлені фотокатоди втратять багато фотоелектронів і спричинять відповідний заряд елементарних конденсаторів. Унаслідок цього на поверхні фотомозаїки виникає своєрідний "рельєф" потенціальних зарядів – заряджених мікроконденсаторів, просторові особливості якого відповідають освітленості пластини. Для спрощення пропонуємо уявити собі пластину-матрицю, на всій поверхні якої стоять стовпчики діаграми, висота яких відповідає освітленості й електропотенціалу в кожному з пунктів стояння стовпчиків. Отже, оптичне зображення створює на світлочутливій пластині "електричне зображення" ("електрорельєф") з позитивних зарядів.

---

[38] Відеосигнал – електричний сигнал, призначений для створення зображення.

Відеосигнал формується на сигнальному електроді в процесі розряду мішені (матриці) електронним променем, що генерується в електронно-променевій трубці і за допомогою фокусуючо-відхиляючої системи швидко оббігає всю мішень (фотомозаїку) по паралельних лініях зліва направо (після зміщення на "крок" вниз – пробіг повторяється). Так продовжується (а процес цей дуже швидкий), поки паралельними пробігами не буде "зчитана" вся пластина фотомозаїки. При цьому пробігу–зчитуванні відбувається дозаряд променем електронів мікроконденсаторів до максимального рівня, а величина струму, затраченого на дозаряд пропорційна різниці потенціалів максимального і наявного зарядів. Отже, в електросхемі трубки виникає струм нерівномірної інтенсивності, промодульований дефіцитом зарядки мікроконденсаторів (зерен срібла), електрорельєфом відеомозаїки[39].

Цей пульсуючий (перемінний) струм, по суті, є вже сигналом зображення – відеосигналом. Він підсилюється і каналами зв'язку може бути переданий на приймальні наземні станції.

На приймальних наземних станціях відеосигнал знову підсилюється і подається на катод приймальної електронно-променевої трубки (кінескопа телевізора чи монітора). Пучок електронів, промодульований відеосигналом, за допомогою своєї фокусуючо-відхиляючої системи оббігає люмінесцентний екран кінескопа, який засвічується відповідно до сили відеосигналу і створює (розгортає) видиме зображення. Дозаряд сильно освітлених зерен був невеликим, а тому струм дозаряду був малим, тобто відеосигнал є оберненопропорційним силі освітлення зерен, тобто "негативним". Відповідно, на наземному люмінесцентному кінескопі потрібно створити "обернене", позитивне зображення.

Утворення вузького електронного променя забезпечує фокусуюча система електронно-променевої трубки, а рух електронного променя по світлочутливій поверхні з "фотоелектрорельєфом" забезпечує відхилювальна система трубки. Чим менший діаметр променя, тим більше можна сформувати рядків зчитування на

[39] Подібний процес відбувається в телефонній трубці, коли електрострум модулюється зміною опору в електросхемі (котушці) мікрофона, яка виникає через вплив на мембрану з котушкою звукових коливань (голосу промовця).

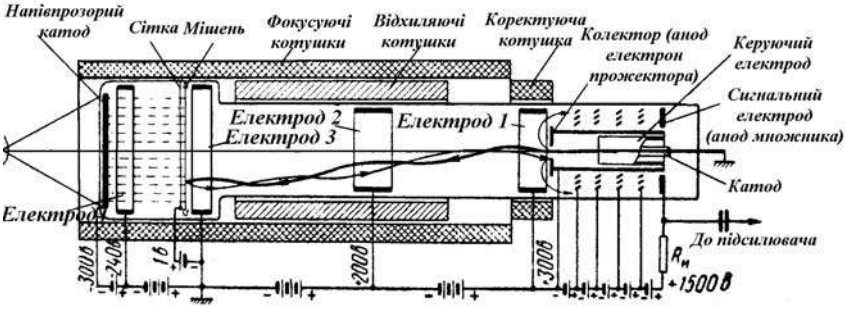



Рис. 3.45. Схема будови знімальної телевізійної трубки “Суперортикон ЛІ-17” [62].

площині екрана, тим дрібніші деталі розрізнятимуться в телевізійному зображенні.

Процес розвитку знімальних телевізійних камер здійснився через схеми іконоскопа, суперіконоскопа, ортикона і суперортикона (рис. 3.45) і відикона. Сучасні трубки космічних телевізійних систем забезпечують 500–1 000–4 000 рядків розгортки.

У відиконі, на відміну від дисектра, електричне зображення у вигляді зарядів утворюється (накопичується) протягом всього часу між черговими циклами зчитування потенційного рельєфу електронним променем. Цей принцип підвищує ефективність роботи трубки і дає змогу формувати телевізійне зображення у вигляді окремих кадрів.

Висока чутливість екранів з внутрішнім фотоефектом, яку застосовують у відиконі, дала змогу спростити трубку і зменшити її розміри, що дуже важливо для орбітального знімання.

Під час телевізійного знімання цикл роботи відикона, в процесі якого виходить один кадр, становить десятки секунд й охоплює експозицію (долі секунди), зчитування електричного зображення і підготовку “стирання” мішені електричного заряду до наступної експозиції. Відеосигнал, який отримують під час зчитування електричного зображення, можна відразу ж передавати каналами космічного зв’язку або записувати на магнітну плівку чи диск. Прийнятий наземною апаратурою відеосигнал перетворюють у видиме зображення на екрані електронно-променевої трубки, з якого також можна отримати знімки на фотографічній

плівці. Формування зображення на екранах моніторів також складається з окремих послідовних і паралельних рядків, через що на фотокопіях з моніторів часто буває видною лінійчаста структура зображення. Така структура обмежує можливості збільшення зображення, бо стають виразними рядки із зображеннями та темні проміжні лінії поміж рядками зображень. З цієї ж причини телевізійні зображення є менш якісними порівнянно з фотографічними. Підвищення якості телевізійних знімків досягають створенням знімальних камер з тонше сфокусованим променем, густішим закладанням пробігів електронного променя і збільшенням кількості ліній пробігів на один кадр (екран).

Названий недолік якості зображення телевізійних знімків водночас є передумовою для комп'ютерної підготовки даних і наступного їхнього опрацювання.

Для *кольорового* знімання застосовують телевізійні камери, які подібно до інтегральної багатозональної фотокамери складаються з кількох (зазвичай, трьох) передавальних трубок, призначених для отримання зображень у різних спектральних зонах. Геометричні спотворення зображень телевізійних камер більші, ніж фотографічних. Технологічна нерівномірність виготовлення мішеней обмежує використання телевізійних камер для фотометрії.

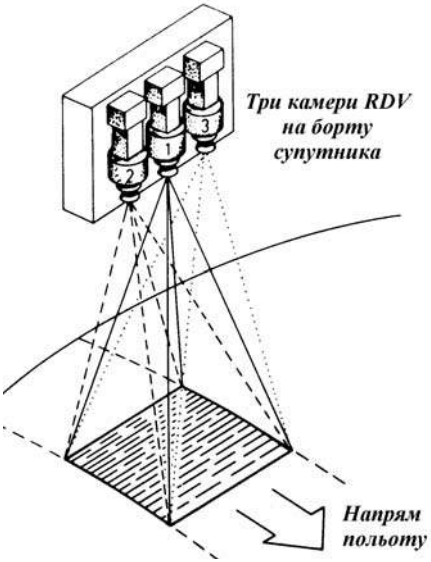



Рис. 3.46. Принцип знімання РБВ-системою з супутників Лендсат 1 і 2 [68]. Показані три телевізійні камери, кожна з яких знімає одну і ту ж ділянку поверхні Землі розміром 100×100 морських миль (185×185 км) у своєму діапазоні ЕМХ.

Майже так само виконують телевізійне *багатоканальне знімання*. Ресурсні супутники Лендсат мали на борту багатозональну знімальну систему з трьох камер – відиконів РБВ (Return Deam Videkon). Кожною камерою з висоти по-

льоту супутника 671 км охоплювалась площа близько 185×185км. Ці три камери вмикались одночасно і знімали поверхню в трьох спектральних діапазонах (голубому-зеленому, жовтому-червоному і червоному-інфрачервоному) (рис. 3.46). Окремі кадри РБВ могли бути суміщені і перетворені синтезованими кольорами.

Під час знімання планет і Місяця знайшли застосування *фототелевізійні знімальні системи*, що поєднують у собі елементи фотографічної і телевізійної апаратури. У таких системах на борту космічного апарата здійснюють не тільки експонування (фотографування), а й проявлення, фіксацію та сушіння фотоплівки. Потім проводять сканування кожного кадру плівки вузьким світловим променем з метою перетворення фотографічного зображення в електричний сигнал і передачі його каналами космічного зв'язку на Землю, де його знову відтворюють на моніторах у вигляді окремих кадрів чи слайд-фільму.

Переваги кадрових знімальних камер полягають в отриманні всього знімка в один момент часу, що забезпечує високу геометричну точність знімків і змогу утворювати з них стереоскопічні пари. Наприклад, кращі фотографічні знімки дають змогу вимірювання їхні плоскі координати з точністю до кількох мікрометрів.

Спектральна чутливість фотографічних і телевізійних камер, зазвичай охоплює зоровий і ближній ІЧ-діапазони. З ультрафіолетового боку спектра робочий діапазон цих камер обмежений прозорістю об'єктивів[40], з інфрачервоного – чутливістю фотографічних плівок і напівпровідникових екранів передавальних трубок. Порівняно з фотографічними, телевізійні камери менш точні, але вони дають змогу оперативно передавати зображення каналами космічного зв'язку.

Просторове розрізнення (піксель-розмір) більшості телевізійних камер супутників "Лендсат" досягав близько 20 м, сьогодні вона постійно покращується.

### *3.4.3. Сканерні апарати (сканери)*

За допомогою сканерів формуються "мозаїчні" знімки, що складаються з безлічі окремих, лінійно-послідовно отримуваних елементів зображення. Розроблено декілька видів сканування. Простим є лінійне сканування у вертикальній площині.

---

[40] Ультрафіолетові промені через звичайне скло не проходять.

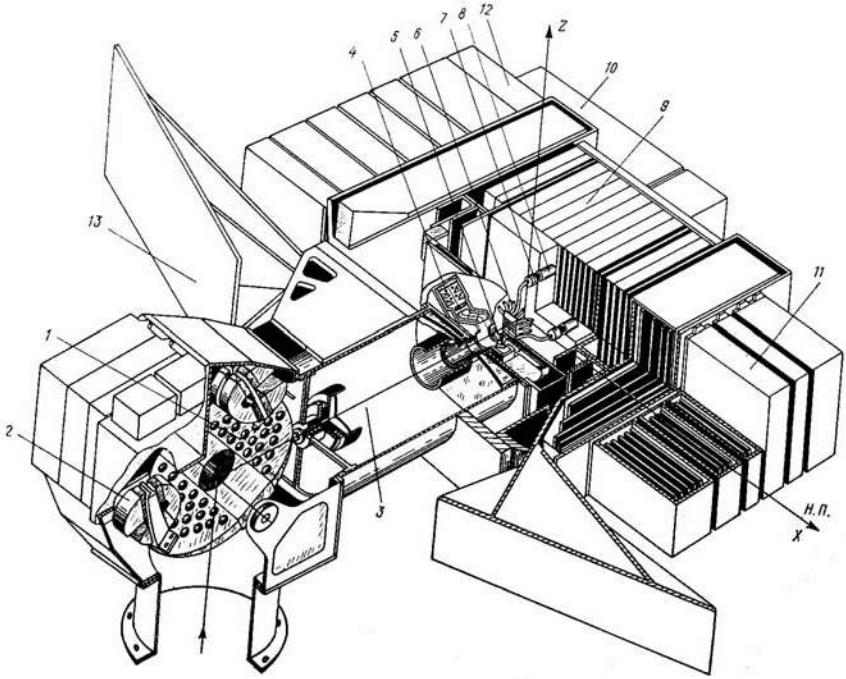



Рис. 3.47. Загальний вигляд і будова багатозональної сканерної системи "Фрагмент" [22].
1– сканувальне дзеркало; 2 – привід дзеркала; 3 – об'єктив; 4 – опорні джерела світла; 5 – оптико-механічний комунікатор; 6 – волоконно-оптичний розгалужувач; 7 – спектральні фільтри; 8 – фотоприймачі; 9 – блоки підсилення; 10 – блок аналого-цифрового перетворення; 11 – блоки системи управління, збору й обробки інформації; 12 – блоки системи електроживлення; 13 – радіатори охолодження фотоприймачів.

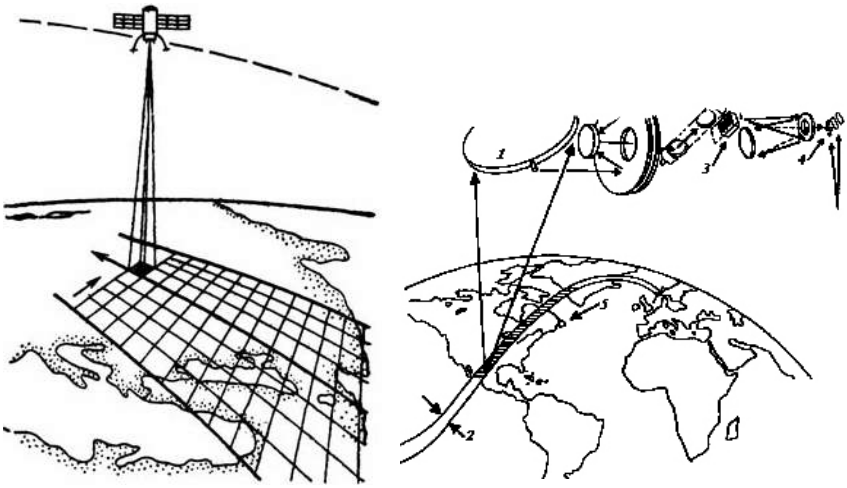
Сканери становлять клас оптико-механічних приладів, у яких оптична інформація механічно переривається і дозується. Першим оптичним приймачем і сканувальним (оглядаючим) елементом системи є дзеркало, яке коливається в площині, поперечній до напрямку руху носія апаратури (рис. 3.47). На дзеркало в певний конкретний момент потрапляє зображення дуже маленької частинки земної поверхні. Від нього променистий потік подається в об'єктив, а далі через "вирізальну" діафрагму на електрофотоприймач, який перетворить його в електричний сигнал, створивши один піксель (крапку майбутнього зобра-

ження). Ця крапка відокремлюється від наступної менханічною системою переривання потоку світла перед об'єктивом – обтюратором чи іншим пристроєм. Між крапками формується вузька смужка без світла. Наступна крапка буде сформована інтегральним світлом від наступної ділянки земної поверхні, бо дзеркало трохи змінило свій кут в процесі коливання. Це світло знову потрапляє на електрофотоприймач, перетворюється на електричний сигнал (промодульований світлом електрострум), який створить новий піксель майбутнього зображення. Протягом коливання дзеркала в один бік створюється ціла лінійка (скан) з таких крапок-пікселів, водночас – відеосигнал лінійки (скану) – струм з перемінними характеристиками, що відповідають величині інтегрального освітлення кожного окремого пікселя в рядку. Наступна лінійка сформується подальшим коливанням дзеркала. Зміщення лінійок відбувається через рух супутника – носія апаратури, і "проглядання" підсупутникової смуги знімання відбуватиметься в наступній паралельній площині. Стабільна швидкість польоту і стабільне функціонування механічної системи переривання зображення забезпечують точне прилягання порядкових пікселів другого ряду до пікселів першого ряду. Так в процесі польоту супутника відбувається безперервне сканування земної поверхні, з якого, лінійка до лінійки (як в тканині нитка до нитки), можна сформувати безперервно нарощувану сканами смугу зображення зі смуги поверхні планети вздовж траси польоту носія.

Для зменшення частоти проглядання місцевості застосовують багаторядкове сканування, під час якого використовують не один, а кілька фотоприймачів, розміщених по прямій лінії.

Отже, у разі знімання сканером зображення місцевості отримують у вигляді безперервної стрічки (панорами), що складається з смуг (сканів), які складаються з окремих елементів (пікселів), число яких становить декілька мільйонів (рис. 3.48, 3.49). У межах елемента зображення (пікселя) відбувається усереднювання яскравості об'єктів, і їхні деталі не розрізняють. На зображенні сканерних, а також телевізійних знімків завжди можна виявити смуги сканування[41], яких немає на фотографічних знімках.

[41] Смуги можна й не розрізнити на копіях сканерних зображень.




*а* *б*

Рис. 3.48. Схеми сканерного знімання:
*а* – загальний вигляд процесу сканування; *б* – вигляд з розрізом сканувального пристрою: *1* – сканувальне дзеркало, *2* – ширина смуги огляду (для ШСЗ "Лендсат"=185 км), *3* – кремнієві детектори і фільтри телескопа на діапазони 1–4, *4* – охолоджені детектори і фільтри телескопа на діапазони 5–7, *5* – напрям польоту ШСЗ.

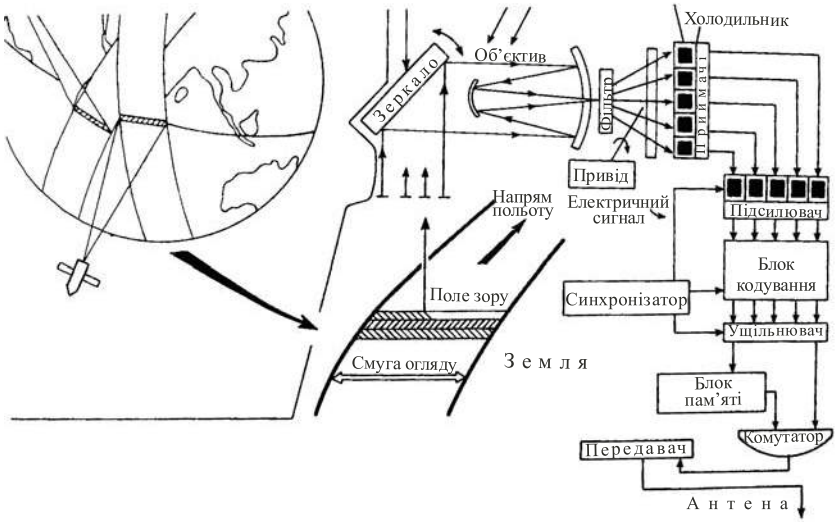



Рис. 3.49. Принципова схема роботи багатозональної оптико-механічної сканувальної апаратури [104].

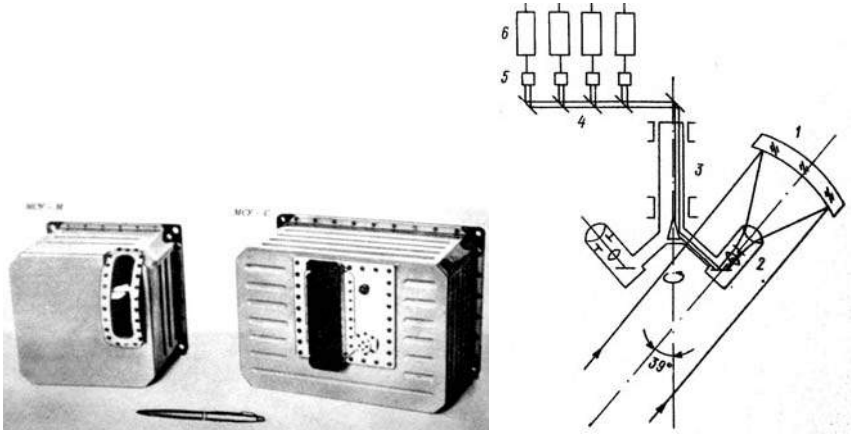
Добре зарекомендований на практиці метод сканування застосовують для отримання зображення у всіх спектральних діапазонах. Він особливо ефективний для знімань у видимому та інфрачервоному діапазонах. Поширені зараз сканери, призначені для вимірювань випромінювання в декількох вузьких (0,1 мкм) спектральних зонах, сканувальні спектрометри працюють за багатоканальною схемою. Конструкція сканера доповнюється диспергованою системою (дифракційні гратки, призми тощо), що розщеплюють світловий потік на спектральні складові, які подаються на різні приймачі.

Важливими характеристиками сканера є кут сканування (огляду) і миттєвий (елементарний) кут зору, який визначає ширину смуги, що знімається і лінійну роздільну здатність на місцевості. У різних сканерів ці кути вельми різні за величиною. У точних сканерів кут сканування зменшують до ±2,5°, а в оглядових збільшують до ±50°. Відповідно до цього і миттєву точку зору встановлюють від десятих доль дугової хвилини до декількох градусів. Кут сканування і миттєва точка зору, а отже поле огляду і роздільна здатність на місцевості, – взаємозалежні величини. Чим вища роздільна здатність сканера, тим менша ширина смуги зніманння. Наприклад, сканер AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometr) на американському супутнику NOAA при роздільній здатності 1 км охоплює смугу знімання 2 700 км; сканер МСУ-СК (рис. 3.50) на російському супутнику "Ресурс-О" при роздільній здатності 150 м знімає смугу шириною 600 км, а сканер МСУ-Э відповідно, 35 м і 45 км; сканер XS на французькому супутнику "СПОТ" – 20 м і 60 км.

При роздільній здатності 1–2 км з космосу сканери, в середньому, знімають смугу шириною в кілька тисяч кілометрів; при роздільній здатності 200–300 м – смуга 1 000–1 500 км, при роздільній здатності 50–100 м ширина смуги знімання не перевершує перші сотні кілометрів.

Чим краща роздільна здатність сканера і ширша смуга огляду, тим більший обсяг інформації необхідно передати за одиницю часу каналами космічного зв'язку. При роздільній здатності 15–60 м і огляді 185 км цей обсяг досягає 150 Мбіт/с ($150\times10^6$ біт за 1 с[42]). Канали зв'язку повинні забезпечувати його передачу.

[42] Дані багатоспектральної камери ETM+ на ШСЗ "Лендсат-7".

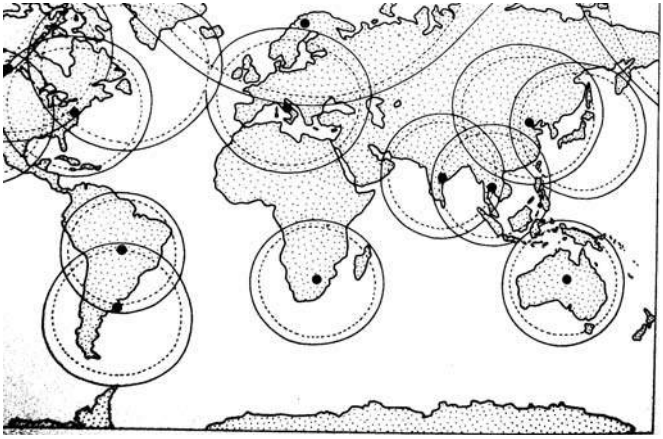



*а* *б*

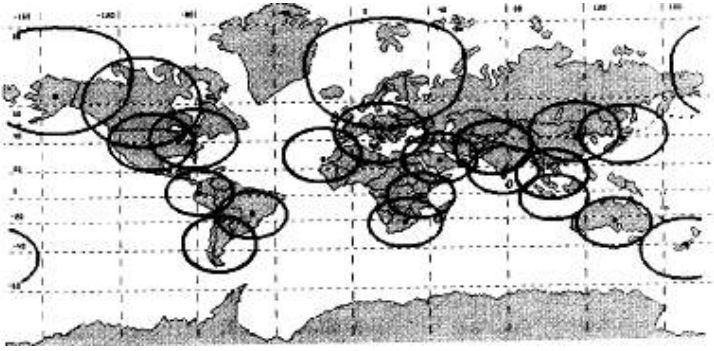
Рис. 3.50. Сканер МСУ:
*а* – зовнішній вигляд МСУ-М і МСУ-С; *б* – функціональна блок-схема МСУ-СК: *1* – сферичне дзеркало, *2* – об'єктив, *3* – сканувальне колесо, *4* – спектроподільна система, *5* – світлоприймач, *6* – вивідний пристрій [104].

Сканери так само, як і телевізійні камери, мають два основні режими роботи – режим запам'ятовування інформації і режим безпосередньої її передачі каналами космічного зв'язку. У першому випадку відеоінформація записується на бортові відеомагнітофони. У разі перебування супутника в зоні радіодосяжності своїх наземних станцій у прискореному темпі з борта супутника в реальному масштабі часу однією з радіоліній передається багатоспектральна інформація, другою – панхроматична інформація сканувального пристрою, а третьою – інформація з бортового магнітофона. Якщо ШСЗ перебуває в зоні роботи приймальної станції, то інформація в реальному часі передається на приймальні станції без запису на борту ШСЗ. Чим більше станцій приймає супутникову інформацію, тим більша швидкість обробки даних. Зокрема, США витратили більше 100 млн. дол. на побудову приймальних станцій ШСЗ "Лендсат" у всьому світі (рис. 3.51). Темп обробки даних при цьому зріс до 200 сцен за добу.

Про геометричні властивості сканерних знімків інформацію подано в розділі "Види дистанційного знімання". Головною спе-



1980-і



2000-і

Рис. 3.51. Центри та зони дії наземних станцій приймання даних зі супутників "Лендсат" (за публікаціями НОАА).

цифікою сканерних зображень (особливо зі сканерів, встановлених на літаках) з великим кутом сканування (90–120°) є те, що сканувальне дзеркало захоплює (оглядає) земну поверхню під різними кутами до лінії надира. Через це розмір елементів зображення на місцевості з віддаленням від пункту надира збільшується. З огляду на це моментальне поле зору сканера в крайових частинах скану (рядка) є більшим, ніж в центральній частині. Відповідно, розтягнутість на кінцях смуги сканування є більшою, ніж в цент-

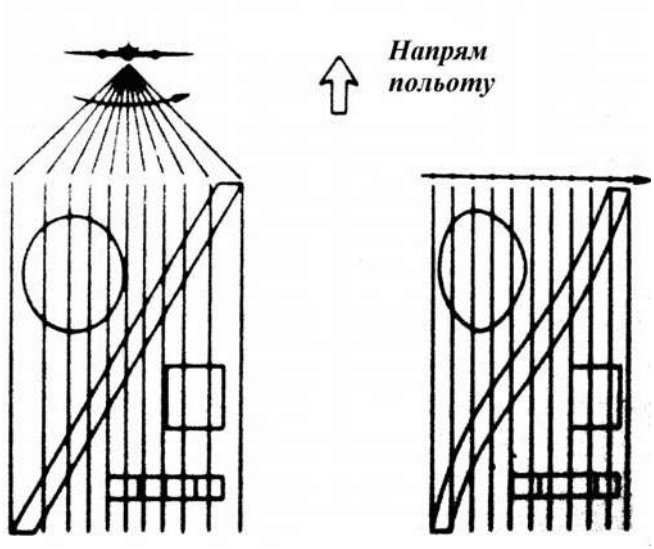



Рис. 3.52. Утворення геометричних спотворень на сканерних знімках: зліва – об'єкт знімання, справа – його зображення [68].

ральній частині. Через те, що гойдання чи обертання сканувального дзеркала є рівномірним, а дані знімання на борту реєструються з постійним лінійним приростом часу, то кожний елемент зображення реєструється в майже однаковому інтервалі часу. Через це на сканерних знімках дуже помітним є крайове стиснення зображення. Це призводить до викривлення косих (стосовно напрямку польоту ) лінійних об'єктів, які набувають S-подібного викривлення, а круги чи кола набувають форми асиметричних овалів (рис. 3.52).

Спотворення місцевості на знімках можуть виникати також через нерівномірність руху сканувального дзеркала чи внаслідок зміни орієнтації носія апаратури в процесі польоту. Через це за потреби високоточного знімання влаштовують наземні контрольні тріангуляційні пункти (не менше чотирьох на одну "сцену" знімання).

Стосовно можливості сканерів сприймати і вимірювати інтенсивність випромінювання в спектральних діапазонах можна стверджувати, що це залежить від їхнього конструктивного нала-

штування, а саме, від якості (ширококанальні чи вузькоканальні) та кількості детекторів для виділення хвиль певної довжини. Про оптимальну кількість спектральних каналів і ширину їхнього діапазону можна зазначати тільки тоді, коли є добре відомою мета знімання та специфіка випромінювання об'єктів запланованого знімання в завданому регіоні.

***Цифрові знімальні камери***

За останні 20–30 років тому відбулися значні зміни в техніці і технології дистанційного вивчення Землі. Вони суттєво вплинули на розвиток геодезії, картографії, фотограмметрії, на науки про Землю, на суму здобутих нових знань.

Найбільший вплив мали:

– розвиток супутникових навігаційних систем;
– поява і повсюдне поширення комп'ютерної техніки з високою швидкодією та з величезними об'ємами пам'яті;
– розвиток мікроелектроніки і розробка нових типів сенсорів, серед яких особливо важливими є т.зв. *"прилади із зарядовим зв'язком" (ПЗЗ)*, які здатні фіксувати електромагнітне випромінювання з високою геометричною і радіометричною точністю;
– розвиток лазерної та оптико-електронної техніки;
– розвиток радіотехнічних способів дистанційного вивчення різноманітних об'єктів, в тому числі земної поверхні;
– розвиток геоінформаційних технологій.

У 90-х роках минулого століття у способах отримання та обробки дистанційної інформації з'явилися якісні зміни. Дистанційне зондування стало на шлях цифрових технологій із застосуванням глобальних позиційних систем (GPS) та цифрових знімальних камер.

Цифрові камери у практиці знімань з'явилися на початку 90-х рр. Спочатку вони не могли конкурувати з плівковими фотокамерами за якістю отриманих зображень. Причиною цього стану була невисока роздільна здатність сенсора – приладу із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), який фіксував відбите від об'єкта електромагнітне випромінювання та продукував електричний сигнал, пропорційний до інтенсивності цього випромінювання (рис. 3. 53).

Відомо, що роздільна здатність плівкової фотокамери вимірюється кількістю ліній в одному міліметрі (л/мм). Сучасні

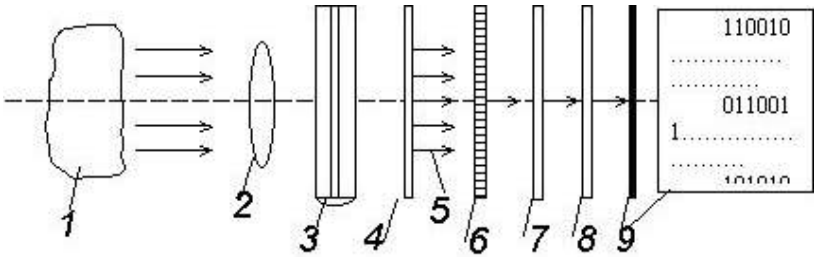



Рис. 3.53. Схема цифрової знімальної камери [38].
Умовні позначення: *1* – об'єкт з електромагнітним випромінюванням, *2* – оптична система (об'єктив), *3* – система світлофільтрів (для кольорового зображення), *4* – ПЗЗ-матриця, *5* – електричні заряди, *6* – регістр, *7* – процесор, *8* – аналогово-цифровий перетворювач, *9* – цифрове зображення.

аерофотооб'єктиви мають в центрі поля зображення роздільну здатність 150 *л*/мм, а дисторсія об'єктиву становить 1–2 мкм, що є вже на грані можливостей геометричної оптики. Такі об'єктиви справедливо називають бездисторсійними.

Роздільна здатність цифрової камери вимірюється кількістю пікселів у одному дюймі (записується як dpi). Щоб досягти точності лінзових об'єктивів плівкових фотоапаратів, розмір пікселя чутливого елемента ПЗЗ повинен становити саме таку величину (1–2 мкм). У 1997–98 рр. передові фірми почали продукувати такі ПЗЗ, стало можливим створити цифрову аерокамеру, в якої роздільна здатність була не меншою, ніж у плівкових апаратів. На даний час навіть у аматорських малогабаритних портативних цифрових фотоапаратів об'єм матриці складає десять і більше мегапікселів ($10^6$).

Для тимчасового збереження відзнятої інформації (фотографій) цифрові фотокамери повинні мати вбудовану та змінну карти пам'яті великої місткості. Залежно від вибраних режиму знімання та встановлення величини роздільної здатності карти пам'яті можуть забезпечувати фіксацію тисяч та десятків тисяч знімків.

Виникла також потреба дуже швидкого зчитування інформації з ПЗЗ. Про обсяг інформації красномовно говорить такий підрахунок: аерознімок формату 230×230 мм при розмірі пікселя 7 мкм містить в собі інформацію обсягом майже 1 гігабайт (GB).

Коли йдеться про накопичення інформації під час знімання сотень і тисяч знімків, то проблема ускладнюється. Тільки обчислювальна техніка з її сучасними можливостями розв'язала це завдання.

Під час зондування земної поверхні необхідно фіксувати лінійні елементи зовнішнього орієнтування та утримувати платформу знімальної камери в горизонтальному положенні. Першу задачу стала розв'язувати GPS, а другу – інерціальна навігаційна система (ІНС). На сьогодні створено три типи цифрових аерознімальних камер:

– ADS40, фірма LH-Systems (Швейцарія),

– DMC2001, фірма Z/I imaging (Німеччина – США),

– HRSC – A, Німецький Центр космічних досліджень (DLP).

Цифрова аерокамера ADS40 є продуктом співпраці фірми LH-Systems та Центру DLP. Принциповим в конструкції є те, що використовується ПЗЗ у вигляді лінійки, а для формування зображення застосований принцип дії електрооптичного сканера.

В площині прикладної рамки поміщені ПЗЗ – лінійки, які одночасно реєструють випромінювання в шести спектральних діапазонах: панхроматичному (чорно-білому), червоному, зеленому, голубому, інфрачервоному першому та інфрачервоному другому. Для діапазону панхроматичного (чорно-білого) особливим є те, що одночасно фіксуються три смуги місцевості: "поглядом вперед", "поглядом надирним" і "поглядом назад". Саме ця особливість дозволяє згодом отримувати стереозображення об'єкта. Інше цікаве конструкторське рішення полягає в тому, що для панхроматичного діапазону в місці прикладної рамки, де має бути одна ПЗЗ-лінійка, поміщається дві. Вони взаємно зміщені між собою на половину пікселя. Кожна лінійка має 12 000 пікселів, а такий зсув підвищує роздільну здатність вдвічі – 24 000 пікселів.

Для діапазонів червоного, зеленого, голубого і двох інфрачервоних використовуються ПЗЗ-лінійки, які фіксують надирну "смугу" місцевості.

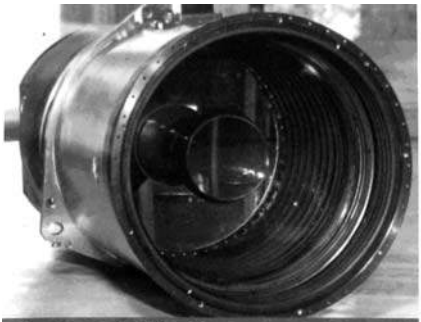
Оригінальним оптичним рішенням є також те, що оптична система проектує на ПЗЗ-лінійки зображення ортогонально.

Цифрова камера DMS 2001 (Digital Modular Camera) (фірма Z/I Imaging) принципово відрізняється від попередньої тим, що в ній використовується ПЗЗ-матриця. Щоб збільшити кут поля зору, в камері використано чотири об'єктиви, зорієнтовані між собою так, що зображення мають між собою мінімальне перекриття.

Оптичний принцип формування зображення – це центральна проекція. Тому в цій камері відсутня деформація зображення, як це є в камері ADS40, і саме тому її конструкція є простішою. Камера використовує стандартну гіростабілізуючу платформу T-AS, має пристрій компенсації змазу зображення.

Цифрова камера HRSC Німецького Центру космічних досліджень (DLR) складається з п'яти ПЗЗ-лінійок, що працюють в панхроматичному діапазоні та чотири лінійки для спектрального діапазону (видимого та інфрачервоного). Найбільше її використовують для створення ортофотокарт забудованих територій.

В Україні провідним виробником сучасної бортової оптико-електронної знімальної апаратури є Центральне конструкторське бюро "Арсенал", розробки якого використовують в аерокосмічному зніманні ще з 1964 р. й експлуатують по сьогодні, в т. ч. на сучасних українських супутниках (рис. 3. 54). Технічні характерис-



| Оптико-механічний блок багатоспектрального сканера<br>Optical and mechanical unit of multiband scanner | |
|---|---|
| Маса, кг / *Mass, kg* | 16,5 |
| Габарити, мм / *Dimensions, mm* | Ø 216 x 520 |
| Висота польоту КА, км / *SC flight altitude, km* | 670 |
| Розрізнення, м / *Resolution, m* | 7,8 |
| Ширина смуги захвату, км / *Swath width, km* | 46,5 |
| Спектральні діапазони, мкм / *Spectral bands, μm* | 0,50 – 0,59<br>0,61 – 0,68<br>0,79 – 0,89<br>0,50 – 0,89 |

| Оптико-механічний блок сканера середнього ІЧ-діапазону<br>Optical and mechanical unit of middle IR scanner | |
|---|---|
| Маса, кг / *Mass, kg* | 7,5 |
| Габарити, мм / *Dimensions, mm* | Ø 150 x 450 |
| Висота польоту КА, км / *SC flight altitude, km* | 670 |
| Розрізнення, м / *Resolution, m* | 40 |
| Ширина смуги захвату, км / *Swath width, km* | 46,5 |

Рис. 3. 54. Оптико-механічні блоки сканерів виробництва ЦКБ "Арсенал" Київ (за матеріалами Національного космічного агентства України).

тики оптико-механічних блоків сканерів продукції ЦКБ "Арсенал" досить високі. Так, для прикладу, роздільна здатність сканерів для різних хвильових діапазонів не гірше 7,8 м з висоти 670 км при ширині смуги охоплення не менше 46,5 км.

На даний час розроблені оптико-механічні блоки 7-канальних сканерів з роздільною здатністю 2,5 м та шириною смуги охоплення не менше 30 км з висоти 670 км.

Поява ПЗЗ-лінійок з високою роздільною здатністю дозволила зреалізувати *космічні знімальні системи високої роздільної здатності* (як приклад, система IKONOS). Електрооптичні сканери цих систем працюють в широкому діапазоні електромагнітного випромінювання і, як правило, одночасно в декількох спектральних діапазонах, що дозволяє використовувати зображення для дешифрування й інтерпретації різних об'єктів та процесів. Потужні приймально-передавальні радіотехнічні комплекси, задіяні в системах, дозволяють оперативно отримувати відеодані та нагромаджувати їх у цифровій формі, придатній для подальшого комп'ютерного опрацювання.

З цифрових знімальних камер отримують цифрові знімки. Опрацювання цифрового знімка ведеться на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС), до складу якої входить комп'ютер, периферійні пристрої та програмне забезпечення для вирішення фотограмметричних задач.

*Цифрова фотограмметрична станція (ЦФС)* в сучасному представленні (за О. Дорожинським) – це система технічних і програмних засобів, за допомогою яких здійснюється опрацювання зображень (цифрових знімків), що дозволяє отримувати кінцеву фотограмметричну або картографічну продукцію [38]. Іноді термін ЦФС замінюють на термін "робоча фотограмметрична станція – РФС".

В ЦФС важливою складовою частиною є фотограмметричний сканер, хоча його можна використовувати і як окремий технічний засіб, незалежний від ЦФС.

Базовим технічним засобом ЦФС є потужний персональний комп'ютер (іноді два), на якому ведеться обробка цифрових знімків. До комп'ютера ставляться високі вимоги стосовно внутрішньої і зовнішньої пам'яті, швидкодії, розмірів графічного екрана. Станція має оптичну систему (стереоскоп) або поляризаційні

фільтри-окуляри для можливого стереоскопічного розглядання та вимірювання стереопари, візуалізованої на екрані комп'ютера. Для переміщення зображень використовують сервоприводи або "мишу" – стандартний технічний засіб ПЕОМ.

Програмне забезпечення є серцевиною технології цифрової фотограмметрії. Чим розгалуженішим і потужнішим воно є, тим більші технологічні можливості має ЦФС. Вважається, що типова станція дозволяє реалізувати такі процеси:

– створення топографічних карт і планів;
– побудова мереж фототріангуляції;
– побудова цифрових моделей рельєфу;
– створення цифрових ортофотопланів чи карт.

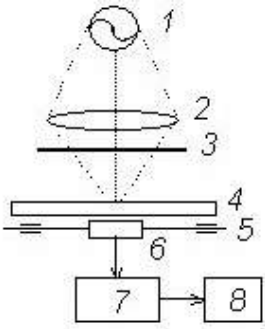
Зображення подається (лівий або правий знімок) на екран, а оператор, розглядаючи зображення через спеціальні окуляри або стереоскоп, прикріплений до корпусу комп'ютера, сприймає ці зображення стереоскопічно.

ЦФС "DELTA" випускає фірма "Теосистема" (Вінниця, Україна), складовою частиною якої є стандартний комп'ютер класу PC. До 2000 року в станції для спостережень використовувався стереоскоп, а пізніше поляризаційні фільтри. Переміщення просторової марки здійснювали або за допомогою штурвалів, або "мишкою". Станція вигідно відрізняється від продукції своїх конкурентів невисокою ціною при досить високих технологічних можливостях.

Характерною рисою усіх станцій є безперервне покращення як технічних параметрів (за рахунок використання потужніших комп'ютерів), так і програмного забезпечення. В цих процесах важливим етапом є виконання стереоспостережень автоматично або при мінімальній участі оператора-фотограмметриста.

Для опрацюванн на ЦФС аеро- чи космічний фотознімок перетворюють в цифрову форму. Це здійснює *фотограмметричний сканер*, схема якого представлена на рис. 3.55.

В якості сенсора сканера найчастіше використовується ПЗЗ-лінійка, а її переміщення здійснює високоточна механічна система типу координатографа чи монокомпаратора. Для фотограмметричного сканера важливими характеристиками є геометрична точність, радіометрія (здатність фіксувати оптичну щільність або колір), а також такі показники як максимальний розмір знімка.




1 - джерело світла;
2 - об'єктив;
3 - світлофільтр;
4 - знімок;
5 - сенсор (ПЗЗ);
6 - координатометр;
7 - фотоелектронний підсилювач;
8 - пам'ять (запис цифрового знімка).

Рис. 3.55. Схема сканування (за О. Дорожинським) [38].

На ринку геометричних сканерів відомі такі фірми: Intergraph (США), Zeiss (Німеччина), Leica, LH-Systems (Швейцарія), Геосистема (Україна) та ін.

Фотограмметричні сканери мають геометричну точність сканування 3,5 мкм при розмірі пікселя 7 мкм або 7 мкм при розмірі пікселя 14 мкм. Число градацій яскравості – 4 096 (12 біт) вихідних з перетворенням в 256 (8 біт) із записом на диск. Час сканування чорно-білого знімка 180 мм з розміром пікселя 14 мкм становить 12 хвилин, а для знімка 230×230 мм 20 хвилин. Передача кольору за один прохід – 24 розряди. Програмно забезпечується запис в форматах DIP, BMP, TIF з розмірами пікселів, кратних до основного 7, 14, 28, 56 мкм. Управляючий комп'ютер Pentium з 17-ти або 21-дюйовим монітором, який працює в середовищі Windows X. Фотограмметричні сканери постійно вдосконалюються.

Під час аерофотознімання велика відповідальність лежить на екіпажі аерознімального літака. Він повинен мати високу майстерність, щоб уникнути браку під час фотографування у польоті, яке є досить дорогим видом робіт. Особливо важко проводити аерознімання з малих висот.

Навігаційні GPS якісно покращили процес аерознімання. Їх стали застосовувати для забезпечення навігації літального апарату та для фіксації просторових координат центрів проекцій (космічних та аерокамер). На сьогодні GPS використовують в комплекті з аерофотокамерами останнього покоління RMK TOP (Zeiss), RC20 і RC30 (Leica, LH-Systems), що дозволяє повністю автоматизовувати аерознімальний процес. В цих системах використовують двочас-

тотний GPS-приймач, який працює в режимі DGPS; тому в районі знімального об'єкта встановлюють наземну базову станцію. Саме диференційований режим дозволяє уникнути неоднозначності у визначенні координат літака після відповідної математичної обробки.

Сучасні системи дозволяють фіксувати положення аерофотокамери з точністю 5–10 см, що задовільняє вимоги навіть великомасштабного картографування.

Застосування GPS під час аерофотознімання дозволяє:

– прокладати аерознімальні маршрути згідно з проектом (координати точок маршрутів попередньо задаються і вводяться в комп'ютер);
– оптимізувати процес заходу літака на аерознімальний маршрут (розвороти, зміна курсу, зміна висоти польоту тощо);
– виводити літак в задану точку простору, звідки треба починати виконувати аерознімання.
– фіксувати координати центра проекції під час експозиції з високою точністю (як зазначалось, до 5–10 см).

Суттєве уточнення процесів знімання і фотограмметрії забезпечує об'єднання GPS з інерціальними навігаційними системами (ІНС).

ІНС складається з гіроскопа (виконує кутову стабілізацію аерокамери під час нахилу літака) та акселерометра (визначає зміну швидкості польоту літака). Об'єднання GPS та ІНС суттєво доповнюють одне одного, а саме: *в короткочасових проміжках ІНС "поправляє" дані GPS, а в довгих часових проміжках GPS компенсує систематичні похибки ІНС.*

Інтегровані навігаційні системи (GPS + ІНС) є тепер невід'ємною частиною цифрових аерознімальних комплексів.

### 3.4.4. Локатори бічного огляду

Огляд локаторами належить до активних методів дистанційного зондування ДЗЗ. Локатори (генератором ЕМХ) виробляють випромінювання в певному діапазоні хвиль, яке спрямовується антенами в потрібному напрямку, а потім антени вловлюють відбитий від знайдених об'єктів сигнал.

Бічний огляд локаторами – один з видів активного знімання з рухомого носія. Його виконують найчастіше в радіо- або акустич-

ному діапазонах хвиль за допомогою знімальних систем радіолокаторів бічного огляду (для знімання місцевості) і гідролокаторів бічного огляду (для знімання морського дна). Сьогодні розробляють також вид активного знімання за допомогою лазерного локатора (лідара), який використовує монохроматичне випромінювання ультрафіолетового і видимого діапазонів.

Під час бічного огляду зондуючі хвилі завдяки вузькій діаграмі спрямованості антени випромінюються і приймаються в напрямі, перпендикулярному до траєкторії руху носія. Унаслідок поступального переміщення носія можна здійснити знімання смуги, паралельної до траєкторії руху, ширину якої визначають дальністю дії локатора. Локатор бічного огляду є прикладом знімальних систем, які дають змогу отримувати "смугові" (маршрутні) знімки.

Схематично знімання місцевості радіолокатором бічного огляду можна показати так. Генератор виробляє радіолокаційні *імпульси* (сигнали), частоту (довжину хвилі) і поляризацію яких можна змінювати, а передавач та антена, встановлені на носієві, випромінюють їх в напрямку, перпендикулярному до лінії польоту, у вигляді плоского і клиноподібного променя радіолокації (рис. 3.56).

У момент добігання променів до об'єкта, здатного їх відбити (до поверхні Землі), вони відбиваються (під кутами, що залежать від орієнтації поверхні), і частина з них повертається до антени. Радіосигнал з антени подається на підсилювач, потім на приймач і на електронно-променеву трубку з люмінесцентним екраном. Зображення на екрані формується світловими тонами, сформованими інтенсивністю сприйнятого відбитого сигналу.

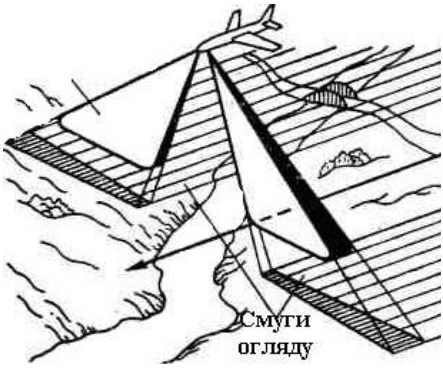


Рис. 3.56. Схема знімання радіолокатора бічного огляду.

Оскільки об'єкти місцевості розташовані на різних відстанях від носія, то відбиті від них радіосигнали поступ-

лять на антени приймача в різний час. Отже, геометричною підставою отримання радіолокаційних знімків є відстань між радіолокатором і об'єктом, яка вимірюється через визначення часу, протягом якого цю відстань проходить імпульс радіохвиль.

Потужність відбитих сигналів залежить від електричних властивостей відбивних поверхонь та від орієнтації елементів нерівностей земної поверхні. Після розгортки відбитого сигналу на екрані електронно-променевої трубки радіолокатора виникає зображення елементарного рядка (смужки) від одного радіоімпульсу, що повернувся до антени. Формує зображення рядка світлова смужка, яка біжить від одного краю екрана до протилежного, що відповідає поверненню відбитого сигналу від ближніх об'єктів до далеких в поперечному боковому просторі. Яскравість смужки залежить від потужності радіосигналу, відбитого місцевими об'єктами. Чим більша відстань до об'єкта і, отже, чим більше витрачається часу для проходження цієї відстані радіоімпульсом, тим далі в рядку електронно-променевої трубки зображається об'єкт. Смужка світиться короткий час і поступово згасає, проте появляється нова смужка від наступного поверненого імпульсу генератора радіолокатора (рис. 3.57).

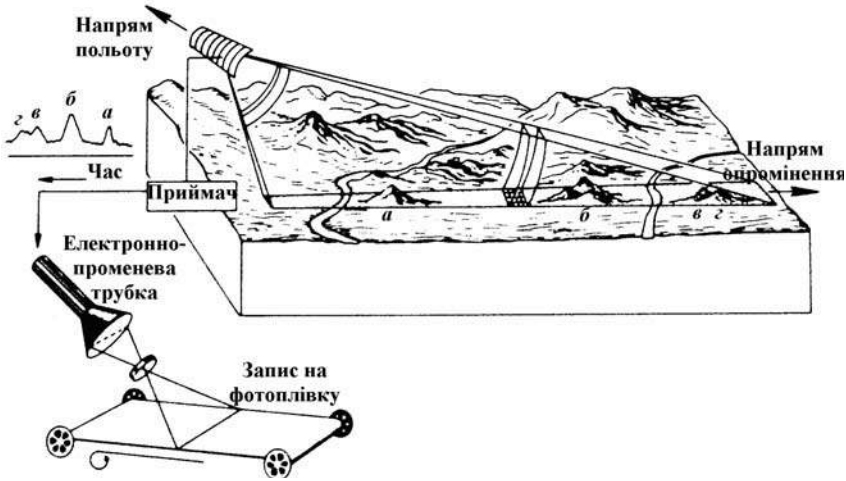



Рис. 3.57. Схема роботи радіолокатора бокового огляду [68].

Зображення вздовж екрана (кадру) будується завдяки поступальному переміщенню носія, під час якого імпульсами послідовно опромінюються смуги місцевості. Якщо екран електронно-променевої трубки фотографувати на рухому фотоплівку, швидкість руху якої пропорційна шляховій швидкості носія, то в результаті вийде знімок у вигляді безперервної стрічки (панорами).

Проекція радіолокаційного знімка належить до рівно-проміжної, такої, що має різні масштаби уздовж лінії польоту і в перпендикулярному напрямку. Можна вважати, що уздовж лінії польоту зображення на радіолокаційних знімках виходить в ортогональній проекції. Масштаб знімка в цьому напрямі залежить від відношення швидкості носія і швидкості руху плівки у фотореєструючому пристрої. Коливання цього відношення приводить до розтягання або стиснення зображення на радіолокаційному знімку в напрямку польоту, що позначається на зміні масштабу. Проекція радіолокаційного знімка в напрямку, перпендикулярному до лінії польоту, тобто уздовж рядка, не буде ортогональною навіть за плоскої місцевості. На екрані електронно-променевої трубки радіолокатора реєструються похилі відрізки, які відрізняються від горизонтальних прокладень тим більше, чим меншим виявиться кут візіювання.

Масштаб запису уздовж рядка, який залежить від швидкості руху по рядку відтворюючої світлової плями на екрані електронно-променевої трубки, який встановлюють з урахуванням розміру екрану трубки і ширини смуги, що знімається. Наприклад, при розмірі екрану 100 мм і ширині смуги знімання 8 км масштаб уздовж рядка повинен бути 1:80 000. Роздільна здатність радіолокаційних знімків у напрямку лінії польоту і перпендикулярно до неї залежить також від форми діаграми спрямованості антени і від тривалості зондуючих імпульсів. Визначальним є роздільна здатність знімків уздовж лінії польоту, яка тим вища, чим вужчий антенний промінь, тобто чим менша ширина діаграми спрямованості антени радіолокатора в горизонтальній площині, яка прямо пропорційна довжині хвилі і обернено пропорційна розміру антени. Тому для підвищення роздільної здатності доводиться робити якомога довші антени.

Якщо траєкторія руху носія точно відома, наприклад, політ щодо Землі строго прямолінійний, то є змога штучно сформува-

ти вузьку діаграму спрямованості завдяки переміщенню в просторі короткої реальної антени (рис. 3.58). Такі радіолокатори отримали назву радіолокаторів *з синтезованою антеною* або зі штучним розкриванням антени. Вони мають таку властивість, що їхня роздільна здатність не залежить від відстані до об'єкта і довжини хвилі.

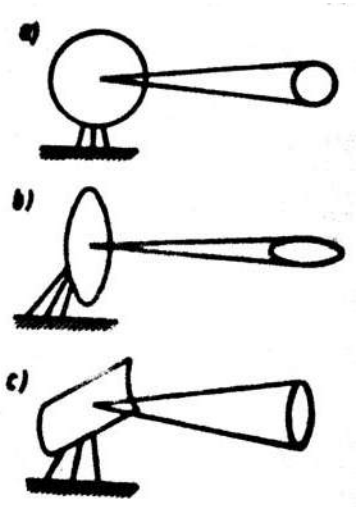



Рис. 3.58. Типи рефлекторів антен радіолокаторів і відповідні їм діаграми спрямованості зондувального сигналу.

У Радянському Союзі були поширені *літакові радіолокатори* бічного огляду "Торос", за допомогою яких отримували знімки з обох сторін польоту літака в масштабі 1:90 000 (або 1:180 000), що охоплюють смуги шириною 13,5 км при висоті знімання 4,5 км. Локатори з антеною вздовж фюзеляжа літака працювали на довжині хвилі 2,5 см при горизонтальній поляризації сигналу на передачі і прийомі. Середній елемент роздільної здатності становив 20×30 м.

Під час *космічного радіолокаційного зондування* природного середовища використовують три основні типи приладів: висотоміри, скаттерометри і радіолокаційні системи бічного огляду з реальною і синтезованою апертурою[43].

*Радіолокаційні висотоміри* застосовують для вимірювання висотного профілю земної поверхні з точністю 2~8 см і можуть бути використані для отримання інформації про рельєф місцевості, морський геоїд, гравітаційні аномалії, висоту хвиль, швидкість вітру, рівні приливів, швидкість поверхневих течій, льодовий покрив і неоднорідності його поверхні, а також про будь-які інші процеси, які приводять до змін середнього рівня або стану поверхні морів.

Принцип дії *скаттерометрів* (вимірювачів характеристик розсіяння) ґрунтується на залежності абсолютної величини питомої

[43] Апертура – лат. – отвір. Відкритість (кута) антенного пучка радіопроменів.

ефективної площі розсіяння морської поверхні і рівня її анізотропії[44] в азимутній площині від швидкості і напрямку приповерхневого вітру. Головним завданням супутникових скаттерометрів є визначення синоптичного поля вітру, що принципово не потребує високої роздільної здатності по координатах.

*Радіолокаційні системи бічного огляду* належать до найбільш універсальних та інформативних давачів дистанційного зондування в мікрохвильовому діапазоні. При цьому розрізняють радіолокаційні системи: а) некогерентні[45] (SLAR); б) із синтезуванням апертури (SAR- в англійській термінології).

У некогерентних радіолокаторів азимутальну (уздовж траси ШСЗ) роздільну здатність визначають розмірами реальної апертури антени.

Радіолокатори із синтезуванням апертури мають високу роздільну здатність, якої досягають завдяки когерентній обробці відбитих сигналів, що приймаються у міру руху супутника по орбіті.

Перевагою некогерентних радіолокаторів є широка смуга огляду, роздільна здатність в якій не залежить від стану (мінливості) зондованої поверхні. Ця специфіка поєднується з порівняльною простотою як самого радіолокатора, так і системи оброблення інформації.

Радіолокаційні системи із синтезованою апертурою антени дають змогу отримувати значно вищу азимутальну роздільну здатність під час знімання геофізичних об'єктів, положення яких залишається незмінним у період когерентного накопичення відбитих сигналів. При цьому роздільна здатність таких радіолокаторів не залежить від відстані між антеною та об'єктом. Однак отримання і оброблення даних в цій системі більш складна і дорожча.

Робота радіолокаційних систем не залежить від умов природної освітленості, а крім того, при застосування для локації хвиль, довших від 2 см, не залежить також від хмарності та погодних умов (дощу, снігу, туману, конвективних рухів повітря), за яких фотографічні і сканерні знімання стають неможливими. Однак зазначимо, що погодні умови дещо впливають на якість знімків

---

[44] Анізотропія – неоднаковість.

[45] Когерентний – взаємозв'язаний. Некогерентний – сигнали, що надходять від джерела випромінювання різними шляхами зі зміною у часі. Не здатні до інтрференції через зміщення в часі фаз коливання.

радіолокаторів із синтезованою апретурою, роблячи їх трохи розмитими, нечіткими.

***Параметри радіолокаційного знімання***

Взаємодію між радіоімпульсом та поверхнею об'єкта знімання визначають такими параметрами, як довжина хвилі, її поляризація, кут зустрічі радіопроменя з поверхнею об'єкта.

Отриманий досвід радіолокаційних знімань показує, що для кожної конкретної теми знімання і дослідження повинен бути виконаний підбір параметрів знімання, оптимальних для даної теми. Варто зазначити, що технологічні витрати зростають з використанням для радіолокації хвиль меншої довжини і більшої частоти.

Найбільш вживаними *довжинами хвиль,* які використовують для вирішення господарських задач за допомогою радіолокаторів бокового огляду, є хвилі в діапазоні від 0,8 до 30 см. Довжина хвиль визначає їхню проникну здатність. Здатність проникати в речовину або проходити через неї в ультракороткохвильовому діапазоні зростає зі збільшенням довжини хвилі. Крім того, проникна здатність залежить від фізичних властивостей самого середовища, а також від кута зустрічі променя з об'єктом. Приблизну глибину проникнення хвилі можна визначити як половину довжини хвилі.

*Поляризація хвилі* стосується напрямку коливань у посланому антеною імпульсі радіопроменя. Коливання можуть мати вертикальний або горизонтальний напрямок коливань, а тоді йдеться про вертикально або горизонтально орієнтований сигнал.

Під час зустрічі з поверхнею зондування сигнал відбивається. Частина відбитого сигналу зберігає вихідну поляризацію, а інша частина внаслідок багаторазового відбивання від нерівностей земної поверхні і фазових переходів втрачає вихідну поляризацію й отримує нові і дуже різноманітні орієнтації коливань. Найсильніше така деполяризація відбувається на територіях, покритих рослинністю, де є багато різноорієнтованих відбивних поверхонь (стовбури гілки листя). З огляду на це радіолокатори з однією поляризацією вихідного сигналу повинні бути обладнані приймальними антенами для прийому деполяризованого відбитого сигналу. Цей сигнал несе багату додаткову інформацію про об'єкт зондування, в тім числі забезпечує можливість аналізу структури земної поверхні, виділення рослинних ценозів.

*Кут падіння радіопроменя* на земну поверхню має вирішальне значення на взаємодію між поверхнею і радіоімпульсом (рис. 3.59). Відбиття досягає максимуму у разі орієнтації елемента рельєфу до радіолокатора при куті падіння променя на поверхню 90°. Вони зобразяться на екрані (чи на знімку) найбільш світлими (білими) плямами. При інших кутах падіння радіоімпульса (на схили різнонахилені і не поперечні до напряму руху носія радіолокатора) поверхні зобразяться різними фототонами. Мінімальні значення відбитого сигналу характерні для схилів, орієнтованих в бік, протилежний від радіолокатора. Якщо кут падіння таких схилів більший від кута падіння променя радіолокатора, то такий схил перебуватиме в радіотіні і його не реєструватиме локатор. Ці схили відображаються на екрані чорними плямами. З огляду на такі особливості формування зображення особливо придатне для оцінки морфометричних характеристик території зондування, визначення переважання схилів певної орієнтації та крутості схилів, однак під час дешифрування знімків завжди потрібно враховувати напрям польоту носія апаратури і лінію його надиру.

*Просторова роздільна здатність* орбітальної радіолокаційної апаратури, звичайно, 10–100 м для систем із синтезованою апертурою

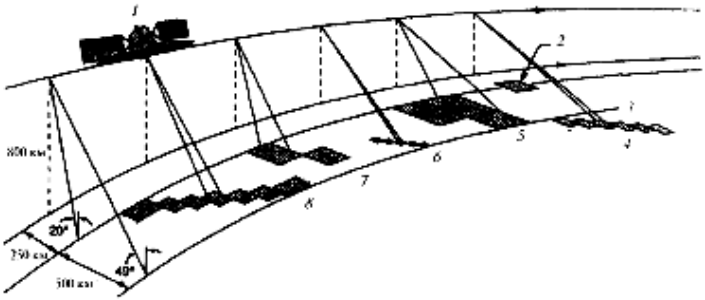



Рис. 3.59. Режими роботи радіолокаційних систем супутника Radarsat. Умовні позначення: *1* – ШСЗ “Radarsat”; *2* – промені перед ближнім краєм основної смуги огляду; *3* – промені за зовнішнім краєм основної смуги огляду; *4* – експериментальний режим (роздільна здатність – азимут×дальність = 28×30 м при смузі огляду 300 км); 5 – оглядовий режим (роздільна здатність – 100×100 м при 500 км); *6* – режим високої роздільної здатності (9×10 м при 200 км); *7* – режим високої роздільної здатності; *8* – стандартний режим (28×25 м при 500 км).

антени і 1–2 км для некогерентних радіолокаторів. Вона швидко поліпшується і вже зіставна з роздільною здатністю оптичних систем.

Інформація зі супутникових радіолокаційних систем передається на приймальні станції в реальному масштабі часу у вигляді цифрового потоку або записується на бортовий магнітофон для подальшого відтворення в зоні радіодії заданої приймальної станції.

Інформативність радіолокаційних зображень Землі залежить від енергетичного потенціалу і роздільної здатності радіолокаторів, від повноти вимірювання поляризаційних характеристик розсіяння спостережуваних геофізичних об'єктів, а також від структури зондованої поверхні і її електрофізичних характеристик. Водночас якість радіолокаційних знімань не залежить від умов освітленості поверхні Землі і наявності хмарного покриву, що вигідно відрізняє ці системи від засобів дистанційного зондування у видимому діапазоні спектра. Крім того, з використанням радіолокаторів бічного огляду можуть бути отримані зображення земної поверхні, прихованої рослинним покривом, а також визначені діелектричні властивості поверхневого шару.

Варто зазначити також, що складність і вартість розроблення радіолокаційних систем космічного базування, зазвичай, перевершує відповідні показники для інших приладів дистанційного зондування. У наслідок цього космічні платформи, оснащені бортовими радіолокаторами, є значно дорогими, великогабаритними і масивними супутниками серед всіх апаратів дистанційного зондування, а цільове призначення супутника визначається передусім можливостями його системи радіолокації. До недоліків цього виду знімання належать також знижені геометричні і зображальні властивості радіолокаційних знімків порівнянно з фотографічними.

### *3.4.5. Приймачі зарядового зв'язку*

Широкі можливості багатозонального знімання спричинили ще більші вимоги користувачів до цього виду знімання. Потрібно було звуження спектральних діапазонів, збільшення кількості каналів, підвищення точності визначення координат, надійності роботи апаратури загалом[46].

[46] Недоліком знімальних пристроїв, особливо сканерів, були деталі апаратів, які десятками років мали перебувати в постійному русі – наприклад, головний елемент сканера – сканувальне дзеркало.

З огляду на це була розроблена нова багатозональна знімальна система – так званий приймач зарядового зв’язку ПЗС – англ. Pushbroom-skaner. У цьому типі знімальної системи тисячі детекторів світла – приймачів зарядового зв’язку утворюють ряди (лінійки), орієнтовані перпендикулярно до напрямку польоту супутника. Для кожного спектрального каналу призначається один ряд детекторів, які послідовно, один за одним, включаються в дію пристроєм, що їх зв’язує – пристроєм зарядового зв’язку. Самі ряди (лінійки) приймачів випромінювання розташовані у фокальній площині оптичної системи, що проектує на них зображення земної поверхні. Поступальний рух супутника забезпечує розгортку зображення вздовж польоту, а розгортка зображення поперек траси польоту виконується поступовим підключенням детекторів. Кожен ряд детекторів зчитується з часовим інтервалом, що дає змогу здійснити безперервний перехід від однієї смуги сканування до іншої (рис. 3.60). При цьому вихідні аналогові за сигнали з кожного детектора підсумовуються за деякий малий проміжок часу, що зумовлює певний розмір розділення на місцевості.

Отже, висока геометрична точність зображення поперек напряму польоту забезпечується точністю розташування детекторів

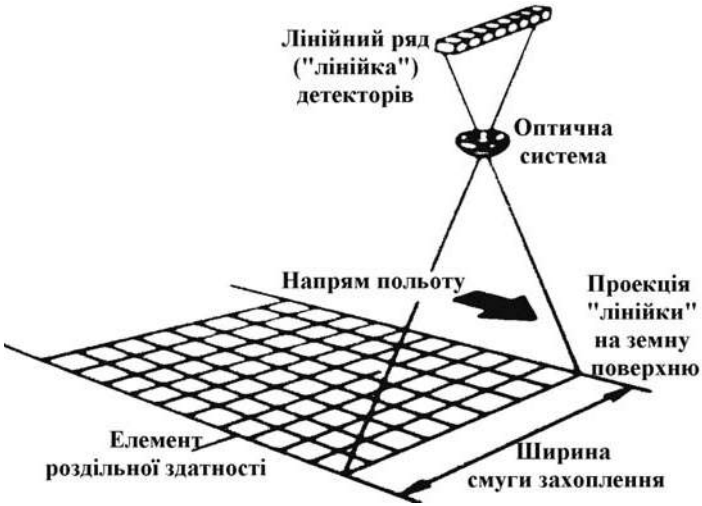



Рис. 3.60. Принципова схема знімання системою зарядового зв’язку.

на лінійці. Взаємозв'язок між сусідніми лінійками, на яких розташовані приймачі, чутливі до різних діапазонів ЕМХ, робить можливим також точну реєстрацію багатозональних даних і кореляцію одного спектрального каналу з іншим.

Оптико-електронний сканер типу ПЗС працює без механічно-рухомих частині з максимальним енергетичним виходом. У кожному окремому приймачі збуджується електричний заряд, пропорціональний яскравості світла, що поступає від одного елемента розділення на земній поверхні. Сигнали зчитуються серіями і записуються на магнітну плівку (або диск) з високою щільністю запису. Вже перші прилади ПЗС показали високу якість їхньої роботи. Наприклад, система МОМС мала 4 лінійки по 1 728 давачів, тобто зображення складалося з 6 912 елементів.

Французька знімальна система типу ПЗС – SPOT (System Probatoire Obserwation de la Terre) мала дві ідентичні сканувальні системи високої роздільної здатності. Просторове розділення сканера в надирі не перевищувало 10×10 м. Знімання виконувалося в трьох діапазонах, що дало змогу отримати кольорові знімки у синтезованих кольорах. Під час застосування знімання двома апаратами з деяким зміщенням оглядового дзеркала (або у разі використання знімків з двох сусідніх обертів орбіти) можна отримати зображення земної поверхні з перекриттям, що забезпечує можливість стереоскопічного опрацювання знімків.

### *3.4.6. Радіометри*

Зазначимо, що наземні об'єкти мають власні випромінювання також і в позаоптичному діапазоні – як і всі тіла, що мають температуру вищу від абсолютного нуля. Це, головно, випромінювання теплового та радіодіапазонів. Поширення цих випромінювань здійснюється за законами радіохвиль.

Оскільки інтенсивність випромінювання невелика, а різниця між інтенсивністю випромінювання окремих об'єктів також незначна, то для вимірювання випромінювання об'єктів земної поверхні потрібно було розробити чутливу апаратуру. На час виникнення такої потреби радіотехніка вже набула необхідного теоретичного та технічного розвитку, а тому прилади для вимірювань власного випромінювання земної поверхні з'явилися одразу в багатьох інститутах і отримали назву "радіометри". Для хвиль

радіотеплового діапазону розроблено "інфрачервоні" – *ІЧ-радіометри*, а для хвиль сантиметрового та дециметрового діапазонів – "надвисокочастотні" – *НВЧ – радіометри*.

Під час розроблення радіометрів вимушеним було обмеження тими довжинами хвиль, які не поглинає або мало фільтрує атмосфера. Крім того, необхідне було використання антен з вузьким кутом огляду місцевості та приймачів з достатнім підсиленням радіосигналу. Для реєстрації сприйнятого і підсиленого сигналу можна було використовувати різні пристрої, найпростішими з яких є пишучі потенціометри, запис рівня сигналу якими може здійснюватися на градуйовану паперову стрічку у формі кривої (осцилограми).

У цій ситуації значним ускладненням на час розроблення приладів була "прив'язка" до об'єктів місцевості або до координатної сітки. Таку роботу виконував штурман літака, прокладаючи маршрут на карті і наносячи маршрут та характерні пункти в підлітаковому надирі (перетин річки, каналу, дороги, краю поля, яру). Водночас інший працівник наносив ці ж пункти на реєстрограму. З поширенням GPS-приймачів та навігаційних карт ця проблема вирішується їхнім паралельним застосуванням і реєстрацією потрібних дорожних пунктів, моментів фіксації і трас маршрутів на навігаційних картах, закладених у переносні комп'ютери, обладнані GPS-приймачами.

Крім складності з прив'язкою кривої осцилограми до об'єктів місцевості, була також проблема звуження кута огляду антени радіометра. На рис. 3.61 показано, що для одного з перших радіометрів, встановлених на літаку, пляма огляду антени становила 0,7 Н, тобто при висоті польоту 100 м сигнал інтегрувався з еліпса довжиною 70 м. Під час швидкості літака 180 км/год та інтервалу між вимірюваннями 1,5 с зніманням могла бути покрита вся траса польоту без просторових пропусків (розривів). Горизонтальний масштаб осцилограми залежав від швидкості руху стрічки, яка могла ступінчасто регулюватись (рис. 3.62).

Вигідним було застосування триканального радіометра, який вів синхронний запис випромінювання для трьох різних довжин хвиль. Амплітуда коливань у записі кожного з каналів радіометрів залежала від рівня випромінювання наземних об'єктів та підсилення цих сигналів.

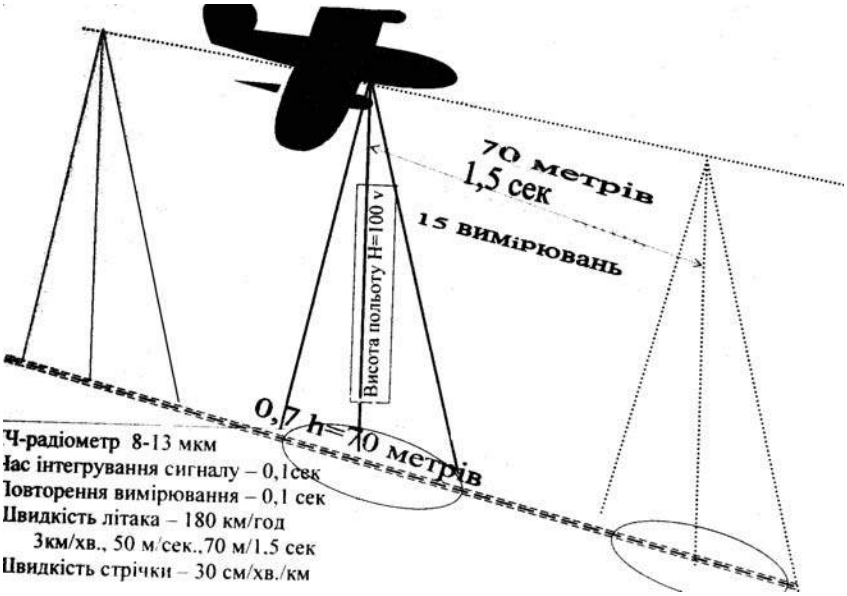



Рис. 3.61. Схема знімання для однієї з перших радянських модифікацій радіометра, використаних під час радіометрії Дністерської тестової ділянки (полігон географічного стаціонару ЛНУ ім. І. Франка біля смт Єзупіль).

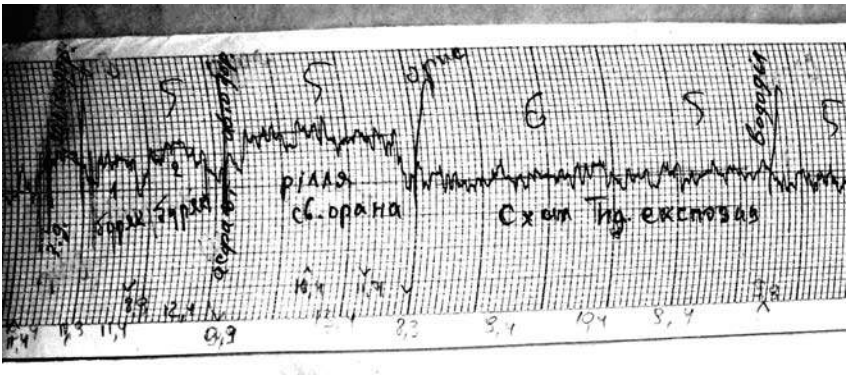


Рис. 3.62. Реєстрограма інфрачервоного радіометра (8–13 мкм) з польоту від 29 серпня 1985 р. з висоти 100 м східніше залізничної станції Єзупіль (з помітками навігатора і дешифрувальника). Найвищі рівні випромінювання, зафіксовані для свіжозораного поля, поля з буряком, а також для залізничної траси.

Кількість енергії, яку випромінюють різні поверхні, залежить не тільки від їхньої фізичної температури, але також і від їхнього хімічного складу, структури, шорсткості тощо. Залежно від довжини хвилі, на яку налаштована антена радіометра, сприймається сигнал з інформацією саме цієї хвилі. Зокрема, найкоротші радіохвилі несуть інформацію, що визначається температурою поверхні випромінювача, довші радіохвилі несуть інформацію і про температуру, і про вологість поверхневого шару випромінювача, а найдовші хвилі цього (НВЧ) діапазону майже повністю залежні від запасів вологи в ґрунті, які визначають так звану діелектричну проникність ґрунту для радіохвиль.

Сьогодні радіометри доведені до досконалості за своїми параметрами, хоча принципова схема їхньої роботи подібна до зазначеної. Крім описаних радіометрів, для вимірювання рівнів власного випромінювання наземних об’єктів застосовують також радіометричні сканери.

# Розділ 4

# ОСНОВИ ДЕШИФРУВАННЯ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ЗНІМКІВ

## 4.1. Суть аерокосмічної інтерпретації знімків

Результатом дистанційного знімання є космічні та аерофотознімки, які стали важливим джерелом інформації про земну поверхню загалом окремі її об'єкти та явища. Ця інформація відображена на знімках в опосередкованому вигляді. Для того щоб виявити, розпізнати та пояснити цю інформацію потрібно її віддешифрувати та проінтерпретувати.

Термін "дешифрування" – російського походження. У західній літературі застосовують термін "інтерпретація", що означає тлумачення. Хоч іноді в спеціальній літературі все частіше вживають термін "інтерпретація" як синонім "дешифрування", проте треба розуміти, що розпізнавання об'єктів на зображеннях власне є дешифруванням, а вже наступний етап – пояснення зображених елементів на знімку – їхньою інтерпретацією.

*Дешифрування* аерофото- і космічних знімків – це виявлення та розпізнавання об'єктів місцевості за їхнім фотографічним зображенням, яке ґрунтується, на закономірностях фотографічного відтворення їхніх оптичних і геометричних властивостей. *Інтерпретація* – тлумачення виявлених закономірностей, що ґрунтуються на взаємозв'язках просторового розміщення об'єктів. Дешифрування та інтерпретація знімків мають фізико-математичне (оптика і геометрія зображення) і географічне (просторове розміщення) підґрунтя.

Під час інтерпретації визначають якісні і кількісні характеристики об'єктів на знімках, їхні взаємозв'язки з іншими об'єктами, наявність і властивості тих об'єктів, які не відобразилися на знімках, а отже отримують нові уявлення та інформацію. Для інтерпретації дистанційних матеріалів потрібна достатньо серйозна підготовка з аерофотографії, фотограмметрії, геодезії, географії, картографії із конкретної галузі дослідження (геології, геоморфології, сільського господарства та ін.), а з орієнтуватися в математичної статистики, теорії інформації і теорії пізнання.

Потреба в дешифруванні знімків з повітря з'явилася з моменту виникнення аерофотознімання. Під час Першої світової війни дешифрування аерофотознімків стало одним з ефективних засобів розвідки. Аерофотознімками користувалися також для виправлення, уточнення і доповнення топографічних карт.

У 30-ті роки XX ст. вперше було поставлено багато теоретичних проблем з дешифрування та інтерпретації аерофотознімків, які знайшли розвиток надалі. Зокрема, ввели поняття про дешифрувальні ознаки й аерофотометоди, провели перші дослідження з мікрофотометричного дешифрування, розглядали психофізіологічні чинники інтерпретації тощо. Здійснювали також дослідження вимірювальних і фізичних методів дешифрування. Особливо цікавими були роботи з вивчення спектральної яскравості об'єктів місцевості з метою вибору найвідповіднішої за спектральною чутливістю аерофотоплівки. Дослідження цього періоду здебільшого не могли бути реалізовані у той час на виробництві через відсутність відповідної технічної бази, але вони слугували підґрунтям для подальшого вдосконалення дешифрування.

До 1938 р. аерофотознімання стало головним методом державного картографування, а інтерпретація аерофотознімків – невід'ємною частиною технологічного комплексу робіт зі створення карт. За аерофотоматеріалами проводили контурно-комбіноване знімання разом з польовим дешифруванням. Його впровадження зробило топографічну карту точнішою і змістовнішою, ніж при мензульному зніманні.

З 1939 р. починається суцільне картографування СРСР і України, у тім числі в масштабі 1:100 000 на основі диференційованого, а також універсального методу знімання. Впровадження нових методів знімання дало змогу перенести великий обсяг

роботи в камеральні умови, що привело до розвитку методів камеральної інтерпретації, особливо під час знімання малодосліджених районів. У цьому випадку всі об'єкти культурного ландшафту підлягали обов'язковому дешифруванню в полі, а значну частину об'єктів природного ландшафту дешифрували в камеральних умовах за ознаками, виявленими на вибраних типових для аерофотозображення ділянках. Впровадження камерального дешифрування потребувало залучення фахівців географів-картографів.

У період Другої світової війни дешифрування широко застосовували у військовій справі. За його допомогою виявляли, а згодом знищували важливі елементи оборони супротивника, такі як бліндажі, вогняні позиції зенітних і мінометних батарей, кулеметні гнізда протитанкові рови і траншеї тощо. Результати дешифрування та інтерпретації були основним матеріалом для створення спеціальних карт у разі топогеодезичного забезпечення військ.

У післявоєнні роки особливо успішно розвивали нетопографічне дешифрування та інтерпретацію знімків, для яких характерним було впровадження камеральних методів. Їхня розробка ґрунтувалася на глибокому вивченні взаємозв'язків елементів природного ландшафту і на залученні нових технічних засобів. Зокрема підвищили якість аерофотознімання, розробили вимірювальні прилади для дешифрування, упровадили аерогеофізичні та аеровізуальні методи досліджень.

Розвиток теоретичних досліджень починали з накопичення, систематизації та узагальнення фактів з оптичної характеристики ландшафтів, дешифрувальних ознак, вибору оптимальних типів аерофотоматеріалів, які мали здебільшого описовий і регіональний характер. Пізніше проводили дослідження з проблем фізіології і психології дешифрування, інформаційної ємкості аерофотознімків, кількісних методів дешифрування, фільтрації аерофотозображення, які мали на фізико-математичне та географічне підґрунтя.

Технологія і методика дешифрування та інтерпретації розвивалися від загальних до конкретних рекомендацій за галузями і регіонами; від якісних до кількісних методів (морфометричних, мікрофотометричних, заснованих та кореляційних залежностях між об'єктами дешифрування та ін.). Велике значення мали

розроблення і впровадження ландшафтного методу інтерпретації, швидкозмінних (динамічних) явищ та окремих технологій галузевого дешифрування.

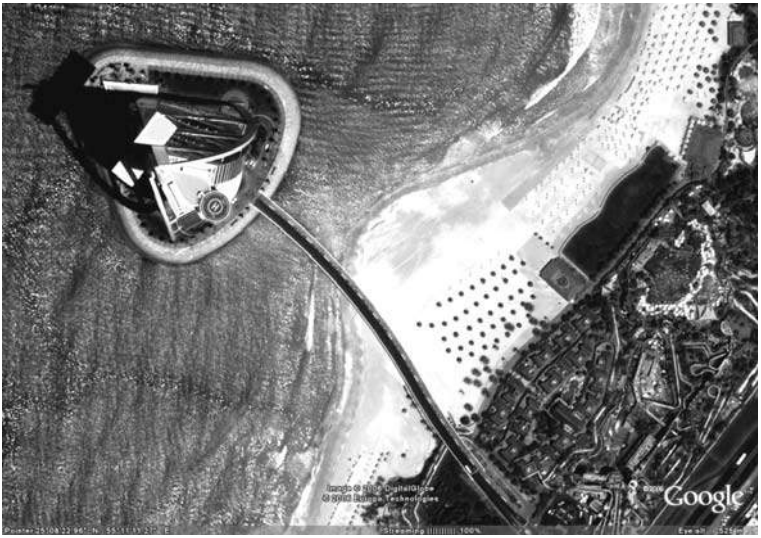
За сучасних умов перспективними є такі напрями інтерпретації знімків: 1) вивчення спектральних характеристик рослинного покриву за допомогою спектрометричного знімання; 2) вивчення дешифрування ознак на підставі їхніх оптико-геометричних і географічних особливостей; 3) аналіз зображень за допомогою комп'ютерних програм; 4) порівняльна дешифрованість різних типів дистанційних матеріалів (одно- і багатоканальних, кольорових і спектрозональних, з різних космічних носіїв); 5) визначення кількісних показників за космічними та аерофотознімками, зокрема, точності відображення об'єктів, усунення похибок вимірювання тощо; 6) застосування знімків для земельного кадастру, екології та моніторингу надзвичайних ситуацій.

Дешифрування та інтерпретація космо- та аерофотознімків відіграли значну роль у розвитку географічної науки. Тривалий час єдиним способом отримати уявлення про місцевість було повільне накопичення відомостей шляхом топографічного чи спеціального знімання. Як засвідчує порівняння знімків і карт, багато чого залишалось непоміченим. Під час дистанційного знімання місцевість з багатьма дрібницями зафіксована на знімках. Окремі об'єкти і явища часто ніякими іншими способами не виявляються. Збільшилась швидкість отримання і переробки інформації, а найважливіше – виникли нові відомості, факти, які досліджені саме за допомогою дистанційного зондування.

Вид місцевості на дистанційних матеріалах є незвичайним і не відповідає звичному для нас земному пейзажу. Виділяємо шість особливостей космічних та аерофотознімків, які відрізняють їх від карт:

1. Планове знімання відбувається з незвичної точки зору. Об'єкти, які ми легко, з урахуванням досвіду, впізнаємо на землі, значно важче розпізнають на аерофото- і космознімках (рис. 4.1). Одна із причин полягає в тому, що багато природних і штучних об'єктів мають віссю симетрії напрям сили тяжіння. Тому дерева, будинки та інші об'єкти ми звикли бачити збоку, а їхній вигляд зверху є незвичним. Проте з набуттям навичок дешифрування процес розпізнавання пришвидшується.

*а*




*б*

Рис. 4.1. Готель Burj al Arab в Дубаї (ОАЕ):
*а* – вигляд збоку, *б* – вигляд зверху на космознімку.

2. Аерофото- і космічні знімки виготовляють на чорно-білій панхроматичній плівці, крива світлочутливості якої не збігаються з відповідною кривою світлочутливості нашого ока. Частково виправляє цей недолік кольорове космо- чи аерофотозображення. Кольоровий спектрозональний знімок дає зображення в умовних кольорах, і потребує спеціального розшифрування (наприклад, листяні ліси – голубим кольором, хвойні – фіолетовим, луки – червоним і т.п.). Це накладає свої особливості на процес інтерпретації.

3. В силу значного узагальнення контурів на знімках зникають окремі об'єкти, що мають малі розміри, але стають добре видимими об'єкти та явища, які при наземних дослідженнях не проявлялися. Наприклад, глобальні тектонічні розломи, характер розчленування рельєфу, впорядкованість природних чи антропогенних об'єктів. Проявляються також деякі невеликі об'єкти, такі як сліди русел рік, що блукали долиною, поховані долини.

4. Одна з відмінностей дистанційних знімків і топокарт є та, що на знімках зафіксований вигляд місцевості в певний момент

Рис. 4.2. Відображення рівнинної території
з сільськогосподарським освоєнням на космознімку (Прикарпаття).

часу, який може бути не найбільш вигідним для дешифрування (наприклад, в зимовий період чи середина літа).

5. На знімках зображене господарське освоєння території, зокрема, сільськогосподарські поля, які не рисують на топокартах (рис. 4.2).

6) Космознімки дають змогу побачити природний образ земної кулі, її материків, океанів, гірських систем чи будь-яких інших великих досліджуваних територій, загалом, що неможливо здійснити ніякими іншими способами (рис. 4.3).

Велику роль під час інтерпретації відіграє наше сприйняття. Ми не просто сприймаємо різноманітні лінії і плями на космочи аерофотознімках, й об'єкти, що зобразилися на них, подумки групуємо лінії і плями в малюнок, намагаючись знайти знайомий образ чи примітити деяку закономірність. Вторинний процес – це вже розчленування образу на елементи. У зоровому образі в перший момент не сприймається ні зернистість знімка, ні мікроструктура складних об'єктів. Лише потім, з досвідом, складається правильне уявлення, виділяється те, що потрібно. Зокрема, спочатку сприймають населений пункт, а потім вулиці, квартали, зелені зони, будівлі тощо.

Часто дешифрувальник у процесі роботи абстрагується від носія інформації – знімка. Йому безпосередньо відкриваються самі предмети. Чим ближче зображення до звичного земного

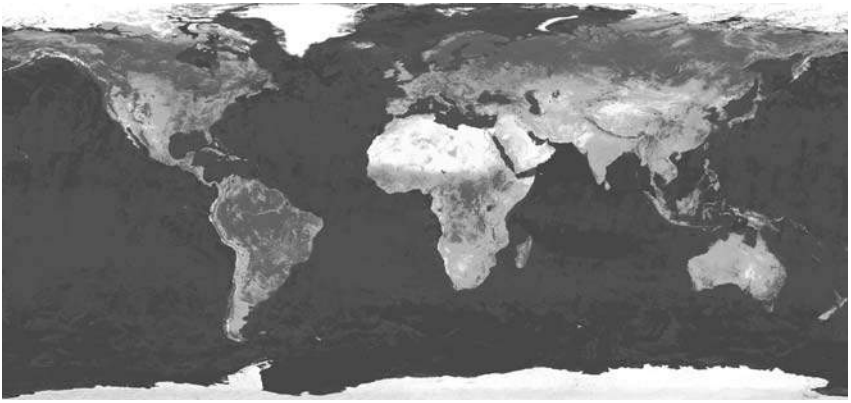


Рис. 4.3. Вигляд земної кулі, утворений поєднанням глобальних космознімків Envisat та фільтрацією хмарності.

вигляду предметів, чим більший масштаб знімка, тим простіше досліднику абстрагуватись від носія інформації – знімка. Відомо, що у кваліфікованого дешифрувальника виникає ілюзія "ефекту присутності". Тобто спостерігач подумки переносить себе у середовище, яке спостерігає, ніби "оживляючи" його. Досягаючи бажаного ефекту, дешифрувальник значно легше розпізнає такі об'єкти. З урахуванням зазначеного процес інтерпретації дистанційних матеріалів поділяють на *етапи*:

І етап – виявлення об'єктів і явищ, які зобразилися на знімках. Розглядаючи знімки, дослідник бачить щось, що відрізняється фототоном або кольором, розмірами, формою, малюнком від інших об'єктів. Чим більше деталей бачить дослідник, тим повнішими будуть результати дешифрувальника. У процесі виявлення спостерігач йде від загального до окремого. Послідовно змінюються стадії: безпосереднє споглядання цілого, поділ зображення на більш дрібні компоненти, виділення елементарних одиниць. Виявлення може бути результатом ціленапрямленого пошуку певних об'єктів або випадковим. У наслідок емпіричного пізнання змісту виявлених об'єктів, дешифрувальник відповідає на питання "що це таке?". Часто при цьому встановлює нові факти. Процес дешифрування, звичайно, відбувається плавно, а визначення нового факту – у вигляді скачка, внаслідок якого розкривають нове значення об'єкта. У подальшому отримані відомості будуть оцінені, і стане очевидно, який об'єм корисної інформації дістали.

ІІ етап – розпізнавання об'єктів, їхня індикація. Розпізнавання можна поділити на стадії – вгадування, виділення ознак, систематизація, синтез і групування ознак, які визначають об'єкт. У досвідчених дешифрувальників ці моменти зливаються у нероздільний процес, але у тих, що вчаться, ці стадії добре виділяються.

ІІІ етап – формування понять і суджень про об'єкт. У результаті виявлення і розпізнавання об'єктів на знімках формуються нові знання про об'єкт, поглиблюються і уточнюються набуті раніше.

З великої кількості інформації, яка міститься на космічних та аерофотознімках, у процесі дешифрування, зазвичай, вибирають не всю, а лише ту частину, яка відповідає тематиці дослідження. Тому дешифрування поділяють на види, залежно від задач:

1) *загальне* (топографічне, фізико-географо-ландшафтне);

*2) галузеве, тематичне* (геологічне, геоморфологічне, геоботанічне, лісотехнічне, сільськогосподарське і т.д.);

*3) регіональне* (наприклад, дешифрування районів багаторічної мерзлоти, карстових областей, пустель тощо).

Такий поділ пред'являє різні вимоги до методів дешифрування та інтерпретації і до властивостей аерофотознімків. Загальне дешифрування є частково, суцільним, а параметри аерознімків повинні бути "усередненими". У цьому випадку розпізнають всі об'єкти місцевості незалежно від їхнього виду і призначення. Важливим є саме виявлення об'єкта і його точна географічна прив'язка. Галузеве дешифрування – вибіркове, виділяють ті об'єкти, які цікавлять спеціаліста певної галузі природничих наук. Параметри аерофотознімків будуть конкретизовані згідно з вибраними об'єктами дешифрування. Під час регіонального дешифрування виявляють характерні об'єкти чи явища на місцевості, а також ті природні та соціально-економічні чинники, які їх зумовлюють.

За методикою отримання інформації, дешифрування поділяють на:

– *евристичне* (ручне);
– *автоматизоване* (яке здійснює комп'ютерна програма).

Евристичні методи дешифрування ґрунтуються на принципах творчої діяльності людини, які не піддаються прийнятній алгоритмізації. Автоматизовані методи ґрунтуються на алгоритмах логічної обробки зображень у процесі машинного пізнання образів.

За засобами виконання дешифрування поділяють на:

1) візуальне;
2) інструментальне, комп'ютерне;
3) польове;
4) камеральне.

*Візуальне* дешифрування – це, зазвичай, дешифрування з літальних апаратів, або його ще називають аеровізуальним. Його проводять при рекогносцируванні території для ознайомлення з місцевістю. Виконують як етап польових знімань місцевості. Доцільні для важкодоступних регіонів, якими є гірські системи, заболочені місцевості, пустелі тощо. Наприклад, висота польоту вертольота з доброю оглядовістю Мі-1 чи Мі-4 200–400 м, швидкість 70–100 км/год. Розпізнавання виконують два дешифрувальника з правого і лівого бортів вертольота. Вони беруть із собою

знімки, які попередньо складають у ряди (їх може бути кількасот). Під час польоту спостерігачі звіряють об'єкти місцевості із зображеними на знімках. Так визначають ключові маршрути для польових досліджень. Головним недоліком цього виду дешифрування є швидка зміна об'єктів, яка не дає змога достатньо зафіксувати дрібні деталі.

*Інструментальне* дешифрування – це отримання інформації за допомогою приладів: від найпростіших – дзеркально-лінзового стереоскопу до складних, таких як стереофотограмметричні станції. Такі станції використовують сьогодні для високоточних досліджень у різних галузях господарства. Стереофотограмметричні станції являють собою потужний комп'ютер (більше 60 Гбайт пам'яті) з великою роздільною здатністю екрану (більше 2 000 пікселів). У пам'ять комп'ютера вводять цифрові знімки й отримують зображення на екрані монітора, яке можна розглядати через оптичну систему, розташовану попереду монітора. Інформацію зі знімків цифрують, і на її підставі створюють карти. Для складання карт використовують різне програмне середовище (див. п. 4.7). Вважаємо різновидом інструментального дешифрування саме *комп'ютерне*.

*Польове* дешифрування полягає в тому, що знімки порівнюють з місцевістю у природних умовах, розпізнають зображені об'єкти, визначають їхні властивості і взаємозв'язки. Під час польового дешифрування дослідники безпосередньо працюють з об'єктами, які картографують. Завдяки цьому досягають високого ступеня достовірності і повноти. Польове дешифрування починають з підготовчих робіт і завершують обробкою та оформленням результатів. Вибирають топо- і географічні карти різного змісту та відповідного масштабу: якщо знімок 1:20 000, то користуються відповідними топокартами 1:25 000, 1:50 000 і т.д. Розробляють маршрути так, щоб охоплювати характерні природні об'єкти. У відкритих районах смуга охоплення – 500 м (3 км маршрут), у закритих – 250 м (6 км для 1:10 000 знімка). Починають польове дешифрування з надійного, добре знайомого контура. Підходять до нього і орієнтують знімок. Часто контури не збігаються, тому вибирають опорні точки, які виразно зображені. Результати наносять безпосередньо на знімок або на кальку. Записи здійснюють у спеціальних географічних журналах.

*Камеральне* дешифрування відрізняється від польового тим, що його виконують у лабораторних умовах. Метод використовують під час дрібномасштабних досліджень материків, рівнин чи гірських систем, протяжних зон. Його перевагами є економічність, комфортні умови праці, можливість кооперування різних спеціалістів, їхнє консультування, застосування різноманітної апаратури. Проте камеральне дешифрування має ймовірнісний характер, що впливає на достовірність результатів і потребує польового доопрацювання.

## 4.2. Ознаки дешифрування об'єктів

Під час камерального дешифруванні важливими є *ознаки дешифрування (інтерпретації)*. Кожному об'єкту місцевості властиві свої конкретні ознаки, які загалом не є постійними, а залежать від масштабів дистанційних матеріалів, сезону знімання, фотоматеріалів, освітленості. Виділяють три типи інтерпретаційних ознак: прямі, комплексні і непрямі.

І. *Прямі* інтерпретаційні ознаки – властивості об'єктів, які безпосередньо передаються на зображенні космо- чи аерофотознімка та їх безпосередньо сприймає спостерігач.

До прямих ознак належать: форма, розміри, фототон (колір) та тінь.

*Форма* об'єкта є головною прямою ознакою, за якою визначають наявність об'єкта і його властивості. Це загальні обриси об'єкта в плані і характер його границь. Саме в контурах відображається основна частина інформації. Зорова система спостерігача передусім виділяє обриси предмета, його форму. Виокремлюють такі форми об'єктів:

1) геометрично визначені – лінійні, квадратні, прямокутні, округлі, паралелепіпедні. Зазначені форми мають, зазвичай, об'єкти штучного походження з прямими лініями і чітко визначеними кутами на вершинах: поля, дороги, присадибні ділянки, антропогенно зумовлені межі лісів. Для антропогенних об'єктів характерна правильна округлість контурів форм (рис. 4.4);

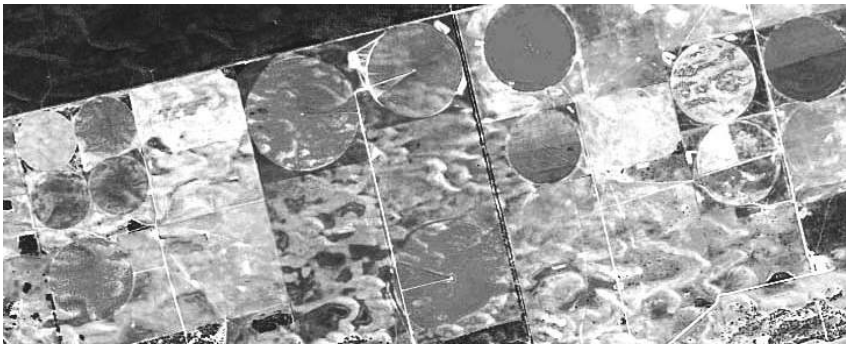


Рис. 4.4. Округлі та квадратні геометрично визначені форми полів виділяються серед невизначених та серповидних форм дюн.

2) довільні або невизначені форми у вигляді плям, масивів певного зображення (луки, болота, виходи порід на поверхню, ліси з природними межами, озера тощо) (рис. 4.5).

Рис. 4.5. Геометрично визначені та невизначені форми об’єктів на космознімку:
за округлою та близькою до округлої формою – карстові лійки, за прямолінійною – меліоративні канали та вулиці, за лінійною звивистою – русло ріки, за квадратною формою – будівлі.

За формою на знімках об'єкти поділяють на:

– точкові;

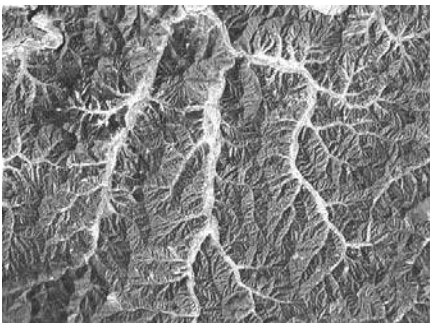
– площинні;

– лінійні (прямі чи звивисті).

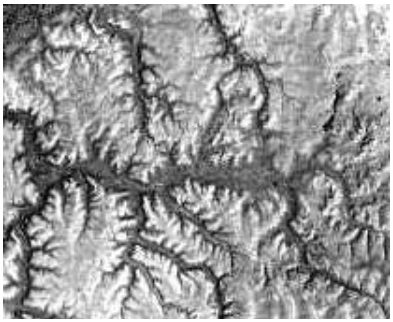
Точкові і площинні форми називають ще компактними зі зменшенням роздільної здатності знімка зображення невеликих компактних форм зливається з іншим, форми вже не виділяються окремо, тоді як лінійні форми із зменшенням масштабу можна читати ще тривалий час.

Розрізняють також *плоскі* форми, які властиві, наприклад, ріллі, озеру та *об'ємні* – характерні для рельєфу, будівель, лісів. Для визначення плоских і об'ємних форм використовують стереоскопічні прилади. При цьому враховують, що форми об'єктів спотворені на аерофотознімках і великомасштабних космознімках унаслідок впливу таких чинників: перепадів висот, нерівності горизонтального і вертикального масштабів (тому на знімках рельєф здається крутішим, ніж насправді).

Добре розрізняють форму об'єкта, якщо є контраст між власне об'єктом і фоном. Тобто ліпше дешифрують об'єкт світлий на темному фоні, ніж темний на світлому фоні (рис. 4.6). Також виразніше розпізнають прості форми – квадрат, коло, лінію, багатокутники порівняно із складними – порізаними чи з розмитими краями. Зокрема, досліджено, що ймовірність розпізнавання



*а*



*б*

Рис. 4.6. Відображення на космознімках долинної мережі світлого фототону на темному (*а*), і навпаки, долинна мережа темного фототону на фоні світлого (*б*). Характерна деревовидна текстура мережі.

багатокутників залежить від вираження кутів форм; імовірність розпізнавання плямистих форм залежать від ступеня порізаності їхніх контурів.

Швидкість розпізнавання простих форм зростає з збільшенням їхніх розмірів, далі знижується, коли об'єкт неможливо розпізнати відразу в цілому. Потрібен певний час на огляд. Об'єкт виявляють тим впевненіше, чим краще підкреслена його форма.

*Розмір* – інтерпретаційна ознака, яка дає змогу за довжиною, шириною і стереоскопічною висотою виділяти об'єкти на знімках. Розміри як в плані, так і за висотою, дають змогу розрізняти однакові за формою об'єкти і порівнювати їх між собою. Наприклад, серед мережі різної ширини меліоративних каналів найбільш широкий вказує на магістральний водоканал; у дельті ріки русло розбите на кілька потоків, за розмірами визначають головне її русло. За розмірами дешифрують одноповерхові і багатоповерхові будівлі у міських поселеннях, у сільських – розміри будівель засвідчують їхнє призначення (житловий дім, господарська прибудова чи громадська будівля) (рис. 4.7). За розмірами довжин тіней розділяють більш високий спілий ліс та молодняк.

*Фототон* – ступінь затемнення фотоемульсії космо- та аерофотознімків, що залежить від яскравості об'єкта. Яскравість об'єкта є змінною величиною, тому забарвлення одного об'єкта залежить від ступеня освітлення, висоти фотографування, оптичних властивостей повітря, якості фотоматеріалів, а також від структури поверхні, кольору, фізичного стану (зволоження) самого об'єкта.

Фототон є дуже важливою ознакою розпізнавання об'єктів на чорно-білих знімках. Інтерпретація за цією ознакою не завжди

*а* *б*

Рис. 4.7. За розмірами визначають одноповерхові будівлі у сільських (*а*) та багатоповерхові будівлі у міських поселеннях (*б*).

однозначна, оскільки відображення об'єкта залежить від його відбивної здатності, морфології поверхні, освітленості об'єкта, пори року, часу знімання та умов фотографічної оброблення. Зокрема, різнохарактерні об'єкти можуть часто зображатись на знімках однаковим фототоном (наприклад, білуватого фототону солончаки, відкриті піски і рілля з зерновими культурами); тоді як об'єкти одного класу – різними фототонами (наприклад, ліс на освітленому схилі і затіненому, світло-сіре і темно-сіре зображення води, що залежить від її мутності). Проте існує закономірність у тональному зображенні об'єктів, яка полягає в тому, що за однакових сезонних атмосферних і фотографічних умов знімання для однієї й тієї ж території простежується відповідність між фототоном зображення об'єкта і самим об'єктом на місцевості. Зокрема, на літніх аерофотознімках сухі дороги, піщані відклади на поверхні, освітлені сторони дахів на будинках зображаються

Рис. 4.8.Темний фототон перезволожених (на схилах) і заболочених земель (у долині ріки).

світло-сірим фототоном. Сірим фототоном у літню пору зображають орні землі з технічними культурами, луки на схилових поверхнях. Темний фототон мають перезволожені землі, листяні лісові масиви. Майже білий фототон характерний для зображення снігів, льодовиків, кар'єрів з видобутку будівельної сировини, солончаків. Майже чорний фототон властивий зображенню глибоких рік, озер, морів з чистою прозорою водою, розораним орним землям, заболоченим ділянкам (рис. 4.8), хвойним лісам.

Знімки, зняті у весняний та осінній сезони, є найбільш пістрявими, що пояснюють багатоманітністю кольорових гам унаслідок неоднакового вегетаційного періоду рослинного покриву.

Людське око здатне вирізняти до 25 відтінків сірого тону: від білого до чорного. На практиці застосовують семибальну шкалу для кількісної оцінки тону: білий; майже білий (білуватий); світло-сірий; середньо-сірий; сірий; темно-сірий; майже чорний.

*Колір* (на кольорових знімках) має більш сталі характеристики, ніж тон на чорно-білих дистанційних матеріалах. Кольорів та їхніх відтінків на космічних чи аерофотознімках значно більше, ніж сірих відтінків, якими зображаються об'єкти на чорно-білих знімках. Кольорову гаму зображених на знімках об'єктів розглядають у двох аспектах. У першому випадку на кольорових знімках об'єкти мають справжній природний колір. Їхнє розпізнавання і класифікація не становить значних труднощів. Враховують такі характеристики кольору, як світлість і насиченість, а також різні відтінки одного і того ж кольору. Проте через вплив низки чинників таких, як висота сонця, висота фотографування та фотообробляння, повного відтворення кольору не отримують, а виходить більш чи менш вдале наближення.

У другому випадку кольорове зображення формують у довільних кольорах (псевдокольорах), які утворюються при спектрозональному зніманні. Кольорові ознаки тут носять мають суто умовний характер. Тому виникає задача інтерпретації самих кольорів, що часто призводить до помилок дешифрування загалом. Проте метою спектрозонального знімання є те, що зображення об'єктів, які не розрізняються під час звичайного знімання, можна було розрізнити за кольором. Спостерігач краще сприймає кольорові контрасти деталей зображення, що збільшує швидкість та ефективність інтерпретації.

Використовували також прийом кольорового кодування. Відбитки з негативів друкували так, що ділянки з різною оптичною густиною, які відображали різні об'єкти, в процесі друку розфарбовували в раніше визначені кольори. Цей метод широко використовували при ландшафтній інтерпретації багатозональних фотографічних зображень. При цьому окремі елементарні ландшафтні одиниці кодували певним кольором, виходячи із подібності ознак та властивостей. Загалом ці таксони, позначені кольором різної інтенсивності і різних відтінків, утворювали на зображенні більшу таксономічну одиницю.

Для оцінки кольорів, що зобразилися на аерофото- чи космічних знімках, нема об'єктивних критеріїв. Користуються спеціальними атласами, де основні кольори визначають за кольоровим тоном, а додаткові – за насиченістю і світлістю тонів. Іноді до характеристики кольору додають назву предмета, що має характерне забарвлення.

*Тінь* – досить непевна інтерпретаційна ознака, оскільки в одних випадках тінь заважає інтерпретації, закриваючи об'єкти або їхні деталі, а в інших – допомагає інтерпретації, оскільки деякі об'єкти можна розпізнати лише за тінню. На космічних знімках роль цієї ознаки менша, оскільки об'єктів, що кидають великі тіні, мало. Здебільшого, це хмари та підняті на поверхнею гірські пасма.

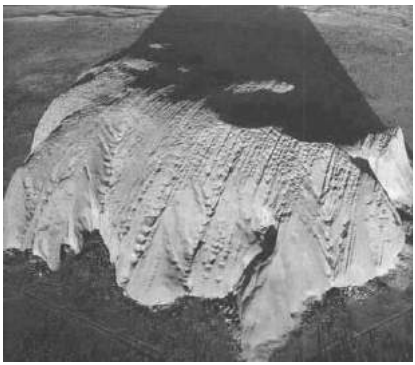
Розрізняють два види тіней:

1. *Власна тінь* (на великомасштабних знімках), що покриває частину об'єкта, неосвітлену сонцем. Наявність власної тіні підкреслює об'ємність об'єкта. Переходи від світла до тіні передають будову поверхні. Різкі границі між освітленими і затіненими частинами свідчать про наявність гострокутних вигинів поверхні, поступові переходи – про плавні згини поверхні. Наявність тіней дає змогу визначити напрям хребтів і долин, положення окремих вершин без стереоскопа і сформувати уявлення про рельєф. Проте тут часто можуть виникати ілюзії, коли хребти уявляють як долини (в цьому випадку знімок розміщають так, щоб лампа замінила сонце і тінь падала до спостерігача, тобто потрібно розвернути знімок на 180°).

2. *Падаюча тінь* – це тінь, яка відбивається від об'єктів. Вона передає їхню форму, близьку до звичної. Інколи тінь зображається

більш контрастно на навколишньому тлі, ніж сам об’єкт, що значно полегшує дешифрування. У деяких випадках виступає єдиною інтерпретаційною ознакою. Наприклад, стовпи, димові труби, окремі дерева, будівлі, геодезичні знаки часто інтерпретують за падаючими тінями, які передають силует об’єкта. Варто зазначити, що тінь, яка відбивається від об’єкта, часто мало нагадує форму самого об’єкта, оскільки тіні проектуються на земну поверхню косими променями і залежать від висоти Сонця (рис. 4.9). За наявності рельєфу тіні або видовжуються або скорочуються. У багатьох випадках за довжиною тіні визначають висоту об’єктів (див. рис. 4.7). Якщо ж розмір тіні більший, ніж розмір об’єкта, то точність вимірювання висот зростає.

*II.* Більшість об’єктів місцевості складається із сукупності однорідних чи різнорідних елементів. Вони відображаються на знімках комплексними ознаками, тобто поєднаннями прямих ознак. До *комплексних* ознак інтерпретації знімків належать *структура і текстура зображення*. *Структура зображення* – це набір елементів різних форм та розмірів, які формують зображення. Вона визначає характер взаємного розміщення об’єктів, величину інтервалів

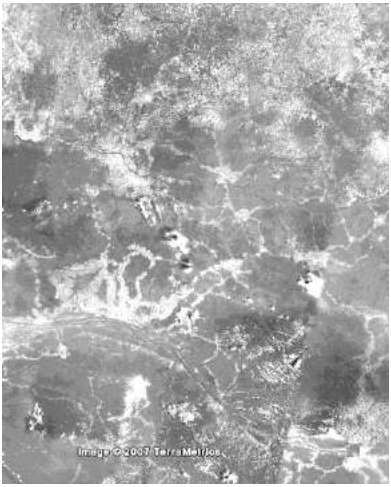


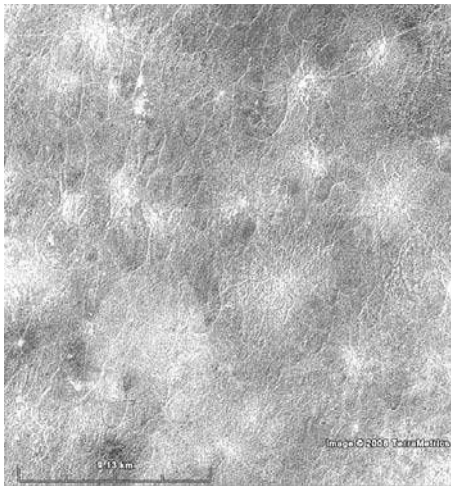
*а*

*б*

Рис. 4.9. Падаючі тіні можуть спотворювати або підкреслювати форму об’єкта на знімках: *а* – падаюча тінь гори-батоліта Айрес-Рок в Австралії, утворена косими променями Сонця, дещо спотворює його форму, проте дає уявлення про розміри (висота 348 м, довжина 3 км), *б* – тінь підкреслює монумент “Україна” і будівлі на майдані Незалежності у м. Києві.

*а*



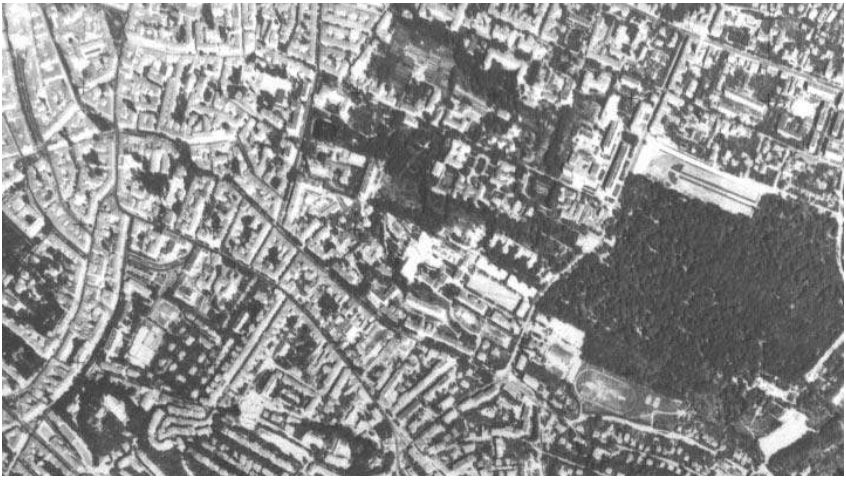

*б* *в*

Рис. 4.10. Структури зображення космознімків: *а* – ґратчаста (Мексика), *б* – плямиста (Екваторіальна Африка), в – зерниста (Середня Азія).

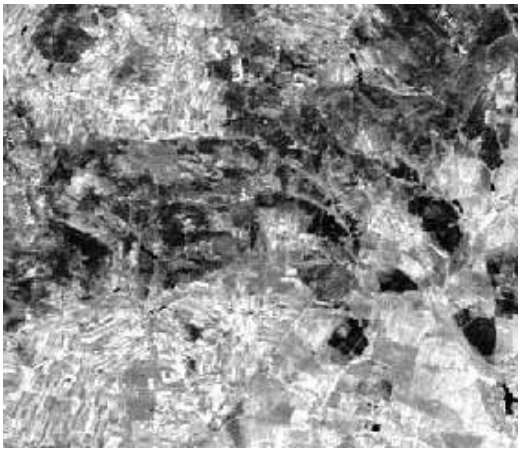
між ними, їхні геометричні та оптичні властивості, а також вигляд поверхні об'єкта місцевості. Елементи структури на зображеннях характеризуються особливостями ґрунтово-рослинного покриву, рельєфу, гідрографії, промислово-житлових територій. Структуру зображення класифікують за геометричним принципом на підставі зовнішніх особливостей елементів, що її становлять. Розрізняють плямисту, однорідну, ґратчасту, зернисту та ін. структури (рис. 4.10). Плямиста структура на середньомасштабних космознімках характерна для лісів і боліт. Ґратчаста структура властива ріллі, зерниста – лукам і пасовищам у степах, однорідна – спокійним водоймам без хвиль.

Структура зображення не є постійною ознакою для одного і того ж об'єкта (за винятком води). Вона змінюється залежно від масштабу знімка. Зокрема, на великомасштабних космознімках та аерофотознімках плямистою структурою зображають перезволожені ділянки в межах полів і лук, що чергуються більш сухими. На середньомасштабних знімках унаслідок генералізації зображення плямистості перезволожених земель не видно. Тут плямистими структурами відобразилися інші об'єкти місцевості –ліси. Ґратчаста структура на знімках великих масштабів характерна для будівель та кварталів будівель у населених пунктах, а на знімках середніх масштабів – полям, що мають прямокутно-квадратні чи близькі до них форми (рис. 4.11). На великомасштабних знімках зернисті структури має поверхня лісу, а на середньомасштабних зернистість властива неосвоєним степам.

*Текстура зображення* – це просторове впорядкування елементів структури, їхнє взаємне розміщення. Текстура утворюється чергуванням в певному порядку однотипних об'єктів. На знімках виділяють смугасту, лінійну, деревовидну, коміркову, віялоподібну, штрихову, кільцеву текстури. Значно поширені на Землі смугасті текстури, якими зображаються паралельні ряди піщаних дюн у пустелях. Лінійною текстурою зображаються меліоративні канали, деревовидною – річкові басейни (див. рис. 4.4), віялоподібною – конуси виносу гірських потоків, штриховою – гірське розчленування на космознімках, смугастою – присадибні ділянки на аерофотознімках та ін. (рис. 4.12). Поверхня Землі дуже різноманітна, в кожному районі при збільшенні можуть проявлятися нові текстури і структури зображення.



*а*



*б*

Рис. 4.11. Гратчаста структура зображення будівель і зерниста лісів на аерофотознімку (*а*) та ґратчаста структура зображення полів і плямиста лісів на середньомасштабному космознімку (*б*).

Структура і текстура, зазвичай, стабільні для одного і того ж ландшафту і відрізняються на зображеннях різних ландшафтів. За зірчасто-однорідними структурами виділяють степові ландшафти, комірково-плямистими – тундрові, зернистими – лісові і т.п. Структура зображення ландшафтів стабільна тільки для знімків певної групи масштабів.

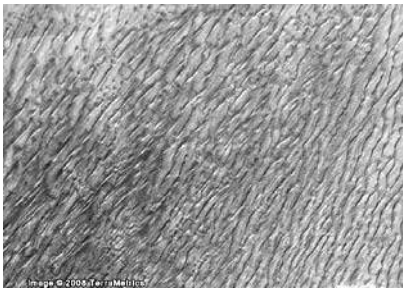
Під час інтерпретації враховують, що зображення на космо- і аерофотознімках відрізняється, хоч на місцевості його формують

*а*

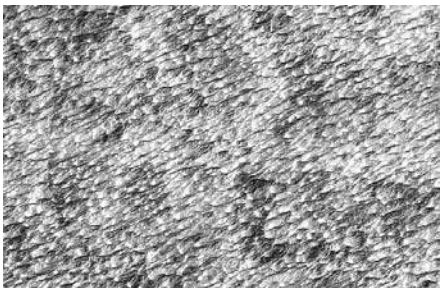
*б*

*в*

*г*



*д*



*е*

Рис. 4.12. Текстури зображень, які трапляються на великомасштабних (*а, в, г*) і середньомасштабних космознімках (*б, д, е*): *а* – віялоподібна, *б* – штрихова, *в* – смугаста селянських наділів, *г* – лінійна, *д* – смугаста дюн, *е* – коміркова дюн.

одні і ті ж об'єкти окремо взятої території. Зокрема, смугасту текстуру на аерофотознімках формують сліди оранки на полях, на космознімках ці сліди не читаються, а смугастою текстурою зображаються інші об'єкти – пустельні форми, такі як дюни, сільськогосподарські угіддя між паралельними меліоративними каналами або особисті селянські наділи.

Текстура зображення, як і структура, змінюється зі зміною масштабів знімків. Зі збільшенням масштабів зникають дрібні деталі і сама текстура узагальнюється. Також зникають одні текстури і з'являються інші. Наприклад, смугаста текстура особистих селянських господарств (присадибних ділянок) добре читається на великомасштабних знімках, тоді як на середньомасштабних не проглядається, натомість з'являються смугасті текстури, характерні для інших об'єктів, які на великомасштабних знімках не читалися – смуги паралельно впорядкованих дюн, ряди каналів тощо.

Структура і текстура на космічних та аерофотознімках утворюють *малюнки зображення*. Це комбінації різних площинних і лінійних форм впорядкованих і невпорядкованих один відносно одного. Розрізняють такі варіанти малюнків зображення:

1) малюнок чи взір, утворений на поверхні однорідного, монотонного об'єкта, наприклад, різна зволоженість ґрунтів;

2) малюнок, сформований чергуванням невеликої кількості об'єктів (чергуванням русел, рукавів). Елементи, що творять ландшафт – це піски, зарості очерету і водна поверхня. У природі це однорідний ландшафт, а на знімках – мозаїчний;

3) малюнок, пов'язаний з рельєфом, який творять поєднання світла і тіні;

4) малюнок, який творить рослинний покрив – багатоманітний;

5) малюнок, створений різними об'єктами і під впливом різних причин. У цьому випадку виділяють провідний компонент.

Загалом під час інтерпретації об'єктів за прямими ознаками не обмежуються використанням лише однієї з ознак, оскільки в цьому випадку його виділення буде мало достовірним. Застосовують весь комплекс прямих ознак – форму, розміри, фототон, структуру і текстуру зображення його поверхні. У разі інтерпретації одних об'єктів домінують одні ознаки, при інтерпретації других – інші.

Прямих ознак інколи недостатньо для успішної інтерпретації, оскільки об'єкти можуть не відображатись на дистанційних матеріалах або вони не мають сталих визначених інтерпретаційних ознак (водна поверхня – різними тонами залежно від скаламучення). У таких випадках звертаються за допомогою до опосередкованих ознак.

*III. Опосередковані (непрямі)* інтерпретаційні ознаки – це ознаки, які непрямо, опосередковано, засвідчують наявність одного об'єкта через присутність іншого супутнього об'єкта. Методичним принципом опосередкованої інтерпретації є принцип єдності навколишнього реального світу, що являє собою систему взаємних зв'язків між окремими компонентами середовища. Тому непряме дешифрування грунтується на природно-географічних чи суспільно-географічних закономірностях, характерних для певної території.

***Непрямі ознаки поділяють на дві групи***

Першу групу становлять різноманітні зв'язки об'єктів та явищ у природі (природні взаємозв'язки і закономірності). Це взаємозв'язки рослинності з рельєфом (наприклад, луки переважають у заплавах рівнинних рік і цим ідентифікують останні), гідрографії з рельєфом (прямолінійні відрізки рік засвідчують розчленовані височинні області), рослинності з ґрунтами (соснові ліси ідентифікують піщані ґрунти), озерності і заболоченості з вічномерзлими ґрунтами (рис. 4.13).

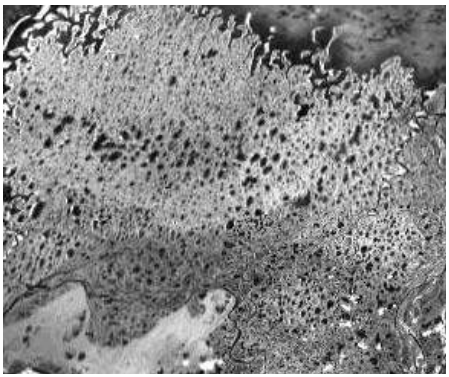


Рис. 4.13. Приклад інтерпретації за непрямими ознаками: наявність великої кількості озер свідчить про поширення багаторічної мерзлоти.

До другої групи непрямих ознак належать зв'язки, які випливають із взаємовідношень антропогенної діяльності з географічним середовищем. Наприклад, характер ґрунтових доріг виступає непрямою ознакою дешифрування складу ґрунтів: світлий тон, більша звивистість, роз'їздженість колій і невитримана ширина свідчать про піщаний ґрунт; темні смуги, чіткіші

обриси, більша розбитість і прямолінійність - про наявність суглинків. Поширення орних земель засвідчує пологосхиловий височинний рельєф, перевага лучної перезволоженої рослинності – рівнинний.

Опосередкована інтерпретація часто є єдиним методом для виявлення тих об'єктів, які не отримали свого вираження на знімках. Наприклад, кільцеві структури, поховані під пізнішими відкладами; ґрунти, закриті рослинністю.

Часто завдяки непрямому дешифруванню можна визначити ті процеси, які не можуть бути сфотографовані. Зокрема, в пустельних районах поблизу морів орієнтація дюнних форм відображає напрямок переважаючих вітрів.

У разі опосередкованого дешифрування спочатку розпізнають об'єкти, які прямо відобразилися на знімках і впевнено інтерпретуються, а пізніше ті, які засвідчують добре розпізнані предмети. Ті об'єкти, наявність і властивості яких свідчать про наявність і властивості інших об'єктів, називають *індикаторами*. Тому непряме дешифрування називають ще *індикаційним*. Під час індикаційного дешифрування вибирають такі індикатори, які перебувають з досліджуваним об'єктом у тісному зв'язку. Наприклад, конфігурація річкових долин з тектонічними порушеннями, поширення родовищ корисних копалин з рослинністю та рельєфом тощо.

Об'єкти, які віддешифровано опосередковано, потім самі стають індикаторами. Поділ об'єктів на індикатори є умовним, бо часто вони міняються місцями. Зокрема, на рівнині індикатором рельєфу часто стає рослинність, а в горах, навпаки, – рельєф, за яким інтерпретують рослинність.

Найважливішим індикатором під час географічної інтерпретації виступає рослинність. Вона тісно пов'язана з рельєфом, ґрунтами, водами та кліматом. Як рослинний індикатор виступають:

1) різниця в основних життєвих формах (дерева, кущі, трави). Наприклад, в окремих районах Середньої Азії дерева та кущі згруповані в місцях виходів вапняків, трави – на піщаних породах і конгломератах;

2) різний рівень життєдіяльності рослин відображає зміну кліматичних умов (верхня границя лісу в горах), умови зволоження (на переході суходолу в болото);

3) розподіл видів і структура рослинного покриву (галофіти – на засолених ґрунтах, гігрофіти пов'язані з водоносністю території);

4) відсутність рослинності є індикатором особливих природних умов (виходи скельних порід тощо), а також на екологічний стан території.

Разом з рослинністю важливим індикатором виступає рельєф. Індикаційними ознаками є такі його морфометричні і морфологічні особливості:

1) абсолютні висоти і амплітуда коливань висот;
2) загальна розчленованість і кути нахилів схилів;
3) орієнтування окремих форм та експозиції схилів (сонячна, вітрова), визначають кліматичні умови і водний режим;
4) зв'язок рельєфу з геологією (від'ємні форми рельєфу свідчать про пухкі породи, додатні – про стійкі; уступи на схилах ідентифікують падіння пластів; карстові форми виявляють карбонатні породи тощо);
5) генезис, вік і сучасна динаміка рельєфу.

Важливу роль індикатора має гідрографія. Це проявляється у тісному зв'язку між структурою і густотою гідрографічної мережі (озер, рік, боліт) та геологією і рельєфом території. Тому аерофотомалюнок річкової мережі виступає як непряма ознака під час геоморфологічних, геологічних і палеогеографічних дослідженнях. В окремих випадках гідрографія ідентифікує також тектонічні структури.

Рослинність, рельєф і гідрографію найчастіше використовують як індикатор тому, що вони самі виразно і детально розпізнаються на знімках. Проте головна роль того чи іншого індикатора залежить від масштабу знімка. Зокрема, в масштабах 1:5 000–1:25 000 чітко відображаються і гідрографія і рельєф, та основним індикатором є рослинність. Вона ідентифікує пологі чи круті поверхні рельєфу, заболочені низинні чи сухі височинні. В масштабах 1:50 000–100 000 важливішим індикатором є рельєф, а на космічних знімках 1:1 000 000 роль основного індикатора перебирає рослинність.

## 4.3. Фізіологічні, психологічні та професійні якості дешифрувальника

Споживачем матеріалів дистанційного зондування Землі є людина, яка ради своїх зацікавлень і потреб свого захисту, а в разі

досягнення належного рівня усвідомлення єдності світу – захисту середовища свого життя, розвинула цю галузь своєї діяльності. Методи дистанційного знімання розвиваються та вдосконалюються, бо вимоги користувачів до можливостей ДЗЗ і якостей матеріалів ДЗЗ постійно зростають.

Сьогодні в архівах спеціальних установ вже нагромадилася величезна кількість матеріалів ДЗЗ різного походження – з різної апаратури, з різного часу, отриманих при певних природних та технічних умовах. У разі потреби вивчати якусь територію в часовому аспекті потрібно порівняти ці різні знімки. Для цього важливе розуміння умов формування інформації (зображення) різних матеріалів, щоб довести їх до стану, придатного для їх порівняння, зрештою, й до розуміння обмежень, закладених в цих матеріалах. Не можна сподіватися на отримання від матеріалів тих характеристик, яких вони не мають. Водночас у багатьох матеріалах є так звані приховані можливості, про які потрібно знати і вміти їх відкрити. Для цього пропонуємо цей розділ, у якому зазначимо лише про деякі широко доступні можливості перетворень знімків.

Перетворення знімків є дією технічною, проте суб'єктивною, бо технічні засоби будуть виконувати завдання суб'єкта. Варто також наголосити на роль і можливості людини під час роботи з матеріалами ДЗЗ.

На даному етапі розвитку методів ДЗЗ, також суспільства і його наук, антропоцентризм проявляється повсюдно, в тім числі і в пристосуванні методів досліджень, апаратури знімання, апаратури опрацювання знімків, а особливо в їхній інтерпретації. З огляду на це дешифрування і використання матеріалів ДЗЗ, треба розглядати як складний процес, який залежить від багатьох якостей автора дешифрування, а саме:

1. Від його фізіологічних можливостей;
2. Від складу психіки;
3. Від професійної підготовки;
4. Від наявності належної апаратури, що забезпечує роботу;
5. Від загальної освіченості;
6. Від суспільного стану і своєї ролі в процесі використання матеріалів ДДЗ;
7. Від поставлених завдань та обмежень;

8. Від суспільного виховання;
9. Від здатності самовдосконалюватися;
10. Від інших непередбачуваних чинників.

Такий неповний перелік залежності результату дешифрування людиною здобутих нею ж згідно зі своїми баченнями та розробленнями матеріалів, призводить до суб'єктивізму в результатах цієї роботи. Саме тому усвідомлення такого стану спричинює потребу визначити ці залежності і діяти у напрямі уникнення долі суб'єктивізму і наближення до об'єктивізму в кінцевому продукті, хоча б на етапі дешифрування.

У цьому розділі ми розглянемо лише ті умови і критерії, які можна врахувати під час організації перетворень знімків та власне дешифруванні, а саме:

- шляхом підбору людей з потрібними фізіологічними можливостями;
- шляхом підбору технічних засобів дешифрування.

Фізіологічність процесу роботи з матеріалами ДЗЗ проявляється через те, що на всіх етапах роботи люди використовують передусім свої органи чуття, зокрема, органи зору. Отже, першим критерієм вибору спеціаліста мають бути характеристики зору, що відповідають певним нормам чи стандартам. Відхилення від норми означатиме гарантоване відхилення від об'єктивності дешифрування.

У розділі 3.3. наголошено на якостях зору, які стосуються такого виду знімання, як застосування "зорового аналізатора". З цього, по суті, починалося використання зору, як інструмента ДЗЗ ( за аналогією використання зору в щоденному житті).

Щодо роботи з матеріалами ДЗЗ *зір відіграє важливу роль*. Це стосується і самого оптичного органу ока у всіх його частинах – склери, що забезпечує оку кулясту форму і захищає його від зовнішнього впливу, рогівки (передньої частини склери), лінзи – кристалика, зіниці [1], скловидного тіла, сітківки з фоторецепторами (колбочками і паличками – органами сприйняття світлової інформації), провідників сигналів рецепторів нервових волокон до кори головного мозку, та самих зорових центрів у мозку. Зазначені органи

[1] Спеціальний отвір у райдужній оболонці склери, який може розширюватися, звужуватися і виконувати функцію, аналогічну діафрагмі в об'єктивах фотоапаратів.

виконують тільки перший етап сприйняття інформації – створюється зорове відчуття (опис і рисунки з розділу 3.3).

Наступний етап – це створення образу, який повинен відповідати отриманим зоровим відчуттям, що є вже дуже складним процесом, у який включається властивості самого мозку, його рефлекторні можливості, устрій та психологічна влаштованість, а також наявна в ньому різноманітна та освітня інформація, побудовані асоціативні зв'язки.

Око має широкі можливості акомодації – пристосування до освітленості, до кольорів та до зміни віддалей до предметів у межах поля зору.

Нормальне око має змогу виразно бачити на віддалях від кількох сантиметрів до безконечності. Час, який звично затрачає око на *акомодацію* стосовно зміни віддалі, дорівнює приблизно 0,5–1 с. З віком цей час дещо збільшується. *Акомодація* – це зміна оптичної сили ока, яка дає змогу чітко розрізняти предмети, розташовані на певній віддалі. Вона відбувається через зміну кривизни кристалика (лінзи) ока під час якої, як у фотооб'єктиві, змінюється фокусна віддаль ока. Зміну кривизни здійснює спеціальний акомодаційний м'яз оболонки ока. Нормальний зір характерний у разі повного розслаблення акомодаційного м'яза (людина також не зводить брови і не "примружує" очі), коли можна бачити до безконечності. Близькі предмети при цьому у віці до 20 років повинні бути виразно видні на віддалі більшій, ніж 10 см. З віком ця віддаль збільшується, коли вона перевищує 25 см, людям для роботи з текстами чи зображеннями стають потрібні окуляри.

Відхилення від нормального зору (аметропія) називають короткозорістю, чи далекозорістю. У разі далекозорості носять окуляри з позитивними лінзами, а при короткозорості – з негативними.

Оскільки це явище поширене, то більшість оптичних приладів: біноклі, знімальні фото і телекамери, мікроскопи чи геодезичні прилади виготовляють зі спеціальним рухомим окуляром – додаткова окулярна лінза.

*Чутливість* очей *до кількості світла* також має широкі межі і забезпечує змогу задовільного та якісного бачення під час різниці освітленості в мільйон разів від нормальної освітленості в бік зменшення і трохи менше в бік збільшення. Око при цьому може прикриватись повіками, змінювати розмір зіниці (від 2 до

8 мм, а по площі – в 16 разів). Звуження зіниці відбувається за 5 с, а максимальне розширення – за 5 хв: спочатку швидко, а потім повільно. Інший спосіб зміни чутливості ока до зміни кількості світла біохімічний – через зміну концентрації спеціальної зорової речовини та захисного затемнювального пігменту в шарах сітчатки, а також через введення в дію різних рецепторів: паличок (нічне бачення) або колбочок (денне бачення). Адаптація колбочок закінчується приблизно за 7 хв, а адаптація паличок може тривати годину і довше, особливо під час переходу від максимальної яскравості освітлення до темноти.

Поріг чутливості нормального ока дорівнює приблизно $9^{-9}$ люкс. Це дуже маленька величина.

Кількість світла, яка відповідає *яскравості* до 25–30 *кандел* на 1 мI очима сприймається як невиразна наявність світла; за яскравості 200 кд/м$^2$ – явне світло, 500 кд/м$^2$ – світло, що привертає увагу, 1 000 – яскравість неприємна, 2 000 – яскравість надмірна, вище 200 000 кд/м$^2$ – яскравість непереносна ( як яскраве сонце чи електродуга електрозварки).

*Контрастна чутливість очей* – їхня здатність розрізняти мінімальні різниці яскравості об'єктів. Ця величина залежить від яскравості фону, а зі збільшенням яскравості фону контрастна чутливість спочатку зростає, а потім, коли яскравість фону стає засліплюючою, – падає. Максимальна контрастна чутливість виникає у разі яскравості фону в 500–600 кд/м$^2$.

*Роздільна здатність очей (гострота зору)* характеризується ступенем розрізняння близько розташованих дрібних деталей: штрихів, крапок. Нормальну гостроту зору оцінюють як одну кутову хвилину (60"). При цьому гостроту зору оцінюють як одиницю. У разі здатності ока розрізнити об'єкти, які потрібно бачити під кутом зору дугових 30", гостроту зору оцінюють як 2. За можливості розрізнити об'єкти з кутом зору півтори дугових хвилини гостроту зору оцінюють як 0,5[2].

Поріг гостроти зору – поріг роздільної здатності – мінімальний розмір об'єкта, який можна виразно побачити очима без збільшувальних пристосувань, дорівнює приблизно 0,1 мм.

---

[2] Наведені значення гостроти зору одержані для умов оптимального освітлення 800 люкс світлом з довжиною хвилі 0,50–0,57 мкм. Відхилення від цих умов освітлення знижує гостроту людського зору.

Важливим дефектом очей є також *зміщення візирної осі* від центра сітківки. У цьому випадку сильно падає роздільна здатність очей.

*Спектральна чутливість очей* обмежена діапазоном 380 780 нм. Це зоровий діапазон, у якому чутливість очей до окремих його ділянок неоднакова, зокрема, у різних людей дуже вона варіює. Крім того, ця чутливість сильно змінюється зі зміною умов освітленості, а особливо під час нічного та денного бачення. Максимальна чутливість очей виражена до хвиль 550–560 нм, та сусідніх з ними ділянок. Тобто, це хвилі зелених та жовто-зелених і жовтих до помаранчевих кольорів, які колись забезпечували виживання людей (колір рослин і їхніх плодів). Тепер ці кольори також приємні за відчуттями і сприятливі для збереження зору. До довжин хвиль 510 і 610 нм чутливість очей знижується в два рази. Приблизно в сто разів падає чутливість до хвиль 430 і 690 нм (сині та червоні хвилі). За низької освітленості простежується ефект зміщення чутливості до хвиль короткого діапазонів (рис. 4.14).

Сприйняття кольорів відбувається через подразнення трьох видів нервових волокон. Збудження одного з них дає відчуття червоного кольору, інших – зеленого і третіх – синього. Світлові хвилі різної довжини збуджують ці волокна з різною інтенсивністю, а кора головного мозку синтезує відносні величини подразнень і виробляє відчуття певного кольору предмета. Око здатне розрізняти коло 200 різних тонів кольору та безліч відтінків.

Важливими для сприйняття зображень є також контрасти фототонів. Зокрема, сірий тон певної густини на білому фоні виглядатиме темнішим, а такий самий сірий тон на чорному фоні – світлішим. Це варто враховувати дешифрувальникам під час візуальної оцінки фототонів зображень. Крім того, розташовані поруч дві плями різних кольорів виглядають більш контраст-

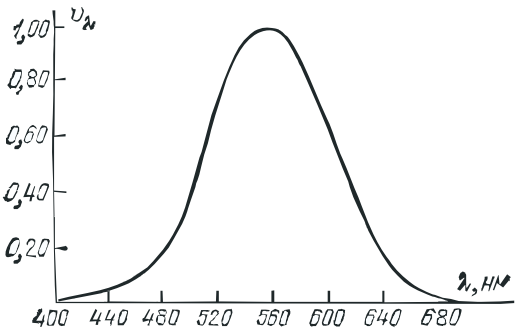



Рис. 4.14. Крива спектральної чутливості очей (у відносних одиницях).

но, ніж ті самі плями, розташовані віддалено. Це означає, що для об'єктивного визначення різниці між плямами кольорових тонів шляхом візуального порівняння їх потрібно розмістити поруч.

Окрім зазначених властивостей, очі можуть мати різні дефекти оптичної природи. Наприклад, недосконале центрування візирної осі чи аберації сферичні та хроматичні (як у фотооб'єктивів). За цих особливостей крапка як об'єкт зорового сприйняття може на сітківку проектуватися, як кружечок, нерізко, або зпроектуватися не туди, куди його спроектувало б середньостатистичне нормальне і здорове око.

*Бінокулярне – стереоскопічне бачення* зумовлене баченням обома очима. Віддаль між центрами очей – "очна база" – коливається в різних людей в межах 52–76 см. Оскільки в кожної людини вона залишається постійною, то змінюється кут сходження візирних осей на пункті, на якому сфокусоване око. Для пункту на іншій віддалі кут буде іншим. Мозок вчиться вимірювати цей кут і співвідносити з ним відстань до предмета. Під час розглядання рельєфного предмета, який має ближчі і дальші пункти, виникають оцінки різних віддалей, і ми бачимо рельєфність предмета. Це відчуття бачення рельєфу обома очима називають *стереоефектом*.

Розглядання предметів одним оком *(монокулярне бачення)* не може призвести до стереоефекту. Під час закривання одного ока оцінювання можливе, хоч і з набагато меншою точністю, але ця оцінка віддалей відбувається завдяки раніше набутому мозковому досвіду оцінювання віддалей двома очима, чи за розміром відомих об'єктів (автомобіль на дорозі). Рельєфність предметів під час розглядання одним оком можлива також через набутий досвід і через наявність світлових тіней. Проте це вже не стереоефект, а ілюзія зорової пам'яті.

Під час розглядання об'єктів через об'єктив знімальної камери створюється завищений ефект тривимірності простору. Так само підсиленою виглядає на зображеннях глибина простору, якщо в межах кадру є ближній план з неприродно збільшеними розмірами, нормальних розмірів об'єкти середнього плану і здрібнені віддалені об'єкти[3].

---

[3] Для ілюстрації можна пригадати якийсь знімок групи людей, коли одні розташовані надто близько, а інші – надто далеко від об'єктива знімальної камери.

Для дешифрувальника часто виникає необхідність використання стереоскопічних приладів. Тож виникає таке *обмеження*: для використання стереоскопічних приладів потрібно мати два рівноцінно здорових ока з повним полем зору.

Дешифрувальнику доводиться працювати з стереопарами знімків для отримання стереоефекту. Стереопарою називають знімки, отримані від фотографування одного і того ж об'єкта з двох точок простору, в яких кут бачення визначеного пункту з цих точок не перевищував би 16°. Масштаби знімків також повинні бути майже однаковими. Такі знімки отримують під час маршрутного фотографування місцевості з літака з перекриттям між сусідніми знімками близько 60%.

Якщо такі аерофотознімки покласти перед очима паралельно і постаратися кожним оком дивитися на ближній до себе знімок та сумістити візирні осі очей на однаковому об'єкті, що є на обох знімках, то може виникнути стереоефект з баченням нерівностей рельєфу, різновисотних будинків чи дерев. Це дивне, приємне і практично потрібне враження й ефект, який дає змогу оцінювати перевищення, визначати висоти форм рельєфу, крутість схилів, виділяти плоскі ділянки земної поверхні. Для полегшення отримання стереоефекту з стереопар знімків застосовують спеціальні пристрої – стереоскопи.

На рис. 4.15 зображено схеми бінокулярного та стереоскопічного бачення. Під час бінокулярного бачення об'єкти спостереження віддалені. З використанням сталої бази очей ($b_2$) мозок визначає кути сходження (конвергенції) на пунктах різновіддалених об'єктів і визначає віддалі до них або рельєфність предмета з наближеними та віддаленими його частинами.

Під час стереоскопічного розглядання знімків об'єкти паперові знімки є плоскими та рівновіддаленими (поверхні $\mathbf{P_1}$ та $\mathbf{P_2}$). Очі разом з мозком оцінюють кути, під якими кожне з очей бачить пункти **A**, **F, B** та віддалі між зображеннями вузлових пунктів на сітківці очей $a_1, f_1, b_1$ та $a_2, f_2, b_2$.

*Пропускна здатність зорового аналізатора* – кількість інформації за одиницю часу, яка може бути сприйнята за певний відрізок часу. Вона впливає на ефективність дешифрування знімків, потрібно розглядання інших зображень і дуже відрізняється у різних людей. У середньому її оцінюють як приблизно 70 біт за 1 с. У

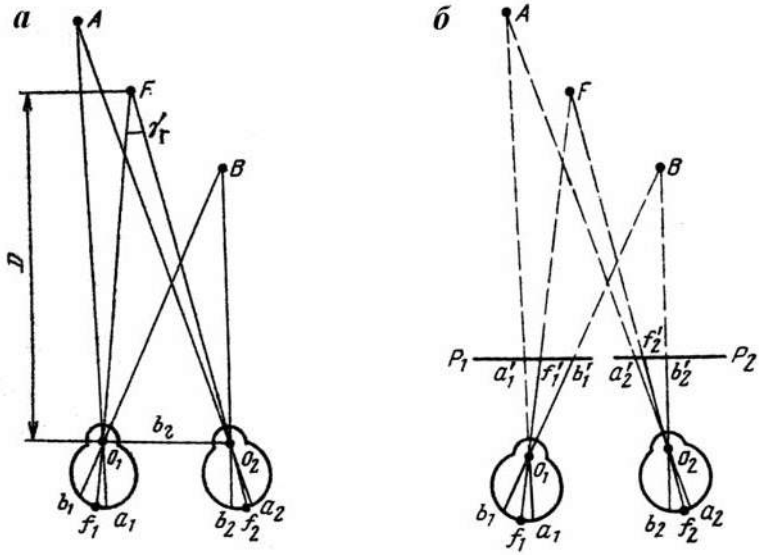



Рис. 4.15. Бінокулярне (*а*) та стереоскопічне (*б*) бачення знімків [2].

разі потреби розумового опрацювання інформації ця швидкість значно зменшується.

На достовірність дешифрування суттєво впливає зорова втома, можливості адаптації та акомодації очей, зорові ілюзії, а також складність та інформативність самого зображення (без урахування психологічних, професійних та інших обставин).

*Зорова втома* виникає після тривалої роботи очей, особливо під час роботи на стереоскопічних приладах, і позначається на зниженні працездатності м’язового та оптичного апаратів очей, унаслідок чого знижується роздільна здатність очей, сповільнюється реакція на зорові подразнення. Ці явища можуть супроводжуватись різзю в очах, сльозовиділенням, головними болями ті іншими розладами нервової системи.

Для тренованого дешифрувальника процес отримання стереоскопічного ефекту з використанням стереоскопа триває близько однієї секунди після початку спостереження.

*Зорові ілюзії* можуть виникати під час різних спотворень об’єктів на знімках, які виникають у разі застосування оптичних заломлювачів – дзеркал, лінз. Поширеною оптичною ілюзією є

бачення "зворотного" рельєфу, коли гребені підвищень здаються видолинками. Лише, коли "спрацьовує" розуміння того, що потоки не можуть текти по вододілах, така ілюзія пропадає. У цій ситуації допомагає також пригадування вигляду рельєфу в натуральних спостереженнях. Після довгого розглядання відомої території на стереопарах може виникнути "ілюзія присутності", коли дешифрувальник думкою переносить себе в спостережуваний простір.

*Час стабільної роботи* дешифрувальника є не однаковим у різних людей, бо це пов'язано з властивостями нервової системи і може тривати від 2 до 7 год безперервної роботи. При цьому важливу роль відіграють також оптимальні умови роботи (освітленість, добрі інструменти, чистота їхніх оптичних складових, належна якість самих знімків).

Оскільки *професійна робота* дешифрувальників починається у віці з уже сформованими психологічними якостями, то успіх професійного дешифрування може бути забезпечений тестуванням психологічним (оптимальним є психологічний тип "сангвінік"), фізіологічним та професійним. Генетично закладені особливості, зазвичай, змінити не вдасться, а професійну підготовку та навики можна вдосконалювати.

*Непрофесійне дешифрування,* наприклад, для вирішення короткочасних і не надто відповідальних завдань, а також для забезпечення своїх інтересів під час підготовки курсових та дипломних робіт студентами та аспірантами, що вивчають географічні об'єкти) можуть виконувати майже всі люди і здоровим зором і незначними його відхиленнями від норми, психологічно врівноважені, уважні, акуратні, відповідальні, усидливі, наполегливі, зацікавлені роботою, з професійною уявою, логічним мисленням та професійно підготовлені. Критеріям професійної підготовки можуть відповідати ті люди з географічною освітою, які мають теоретичну підготовку з фізики (оптики, електроніки, радіофізики), знають специфіку дистанційного знімання Землі різними апаратами з різних висот в атмосфері та з різних космічних орбіт, а також процеси формування зображення в різних знімальних системах. Найважливішою якістю географічної підготовки є універсальні теоретичні знання з найрізноманітніших географічних дисциплін, вироблені практичні навики і наземний "польовий"

досвід з географічними об'єктами, розуміння єдності світу та просторових процесів і зв'язків у географічній оболонці, тобто має бути вироблене і розвинуте специфічне *географічне мислення.* Цю якість важко набути фізикам чи іншим спеціалістам, і через це географи часто стають дешифрувальниками, а особливо інтерпретаторами матеріалів ДЗЗ.

## 4.4. Перетворення дистанційних матеріалів

Усі перетворення, які виконують з матеріалами дистанційних знімань, розраховані на поліпшення роботи з ними, підвищення їхньої загальної інформативності, виявлення скритої інформації, виокремлення чи підсилення спеціальної інформації, позбавлення спотворень, видалення анормальних ефектів, дефектів, а все в комплексі – для отримання найкращих результатів дешифрування. Майже всі перетворення знімків виконують з розрахунку на зорове їхнє психофізіологічне сприйняття та опрацювання – безпосередньо візуально, або через допоміжні оптичні, оптично-цифрові та комп'ютерні системи

Вже на етапі планування ДЗЗ виконуються спеціальні умови, які спрямовані на отримання матеріалів з певними характеристиками та на заплановані ймовірні перетворення. Навіть самі знімальні системи конструюються з розрахунком на перетворення та на якісне виконання цього процесу. У самому процесі знімання вже здійснюється кілька перетворень самих потоків ЕМХ, передбачених технологією знімання. Ними можна вважати:

1. Перетворення потоку ЕМХ в фотохімічне реагування;
2. Перетворення потоку ЕМХ в електронне фоторезисторне, катодне емісійне чи електроконденсаторне реагування;
3. Розділення інтегрованого потоку ЕМХ на спектрозональні чи вузькоспектральні потоки;
4. Перетворення радіосигналу в реєстрограму;
5. Всякі способи апаратного підсилення;
6. Перетворення площинного оптичного чи іншого сигналу в лінійний електричний та радіосигнал;

7. Перетворення електро- та радіосигналу в запис на магнітних носіях (плівках, дисках);
8. Перетворення одномірного лінійно-послідовного сигналу в площинне зображення; перетворення непостійного люмінесцентного відклику монітора в фотографічне зображення;
9. Перетворення одномірної лінійно-піксельно організованої інформації в площинне зображення;
10. Формування світлотіньових аналогів тримірного зображення;
11. Різні непланові оптичні, фотохімічні, механічні технологічні спотворення.

Цей перелік можна продовжувати, однак дешифрувальник уже не може втрутитися в процес закінченого знімання, а лише виправити деякі спотворення, применшити їхній вплив, або ж врахувати їх для об'єктивізації дешифрування. Саме з цією метою в посібник введено багато інформації про знімальні системи та процес формування матеріалів ДЗЗ.

У цьому розділі подано лише ту інформацію, яка можуть бути застосовувати користувачі готових матеріалів ДЗЗ.

Найчастіше користувач матеріалів ДЗЗ працює з паперовими, плівковими зображеннями або ж з магнітними плівками та дисками, з яких можна сформувати зображення на екранах моніторів. Власне останнє – перетворення інформації з магнітних носіїв у відеозображення на екранах моніторів – також є одним з різновидів перетворень інформації ДЗЗ, які називаємо *перетворенням виду*. Вони стали зараз найпопулярнішими через поширення комп'ютерної техніки, доступ до інтернету і дистанційної інформації, яка там зосереджена. Зазначимо, що розроблені і вже доступні багато комп'ютерних програм для опрацювання електронних зображень, які прийшли на зміну давнішим способам опрацювання та перетворення знімків.

Оскільки принципи роботи комп'ютерних перетворень знімків зрозумілі лише розробникам комп'ютерних програм і наслідують принципи і методи, розроблені раніше для механічних, світлових чи хімічних перетворень, які можна фізично сприйняти та легко зрозуміти, то розглянемо ці початкові, вихідні методи.

Для успішного дешифрування користувач може застосовувати різні види перетворень і передусім *фотохімічні, геометричні та фотограмметричні*.

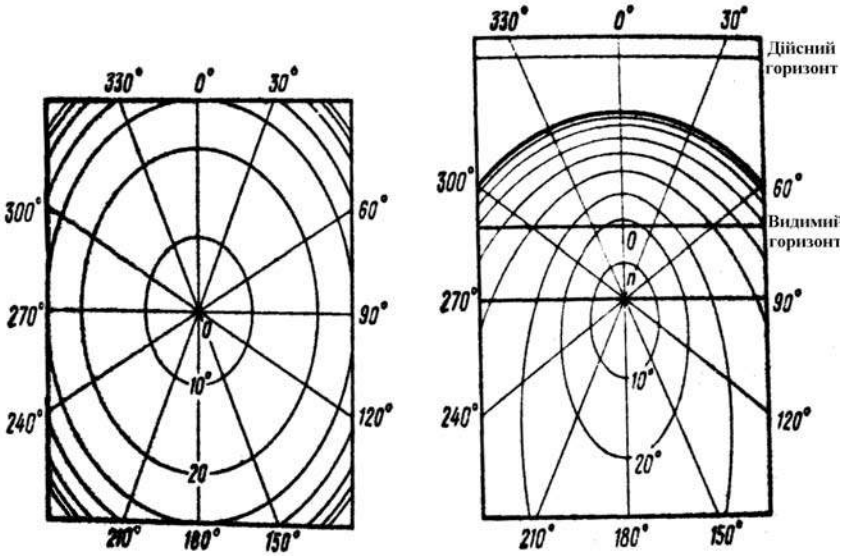



Рис. 4.16. Схема зображення на космічному знімку сітки умовних паралелей та меридіанів з полюсом в підсупутниковій точці: зліва – на горизонтальному знімку, справа – на нахиленому знімку [14].

*Перетворення геометричні* можуть стосуватися правильності передачі геометричних фігур, відповідності параметрам картографічних проекцій, також простої зміни масштабу зображення – їхнього збільшення, чи зменшення.

Перетворення геометричні стають необхідними, коли знімання виконані з відхиленням візирної осі апарата від прямовисної лінії, бо в цьому випадку не вдається об’єктивно прив’язати зображення до карти. Значними бувають спотворення на космічних знімках, що охоплюють великі простори земної поверхні з причини кулястості Землі (рис. 4.16).

Як показано на рис. 4.16, *на горизонтальному знімку*, в якому головна точка знімка ***O*** збігається з пунктом надиру, відтворюються правильні пропорції центральної рівнокутної проекції. Паралелі зображаються концентричними колами, а меридіани – радіальними прямими лініями. Добре видно вплив кулястості Землі, що передається згущенням кіл паралелей до периферійних частин знімка, особливо в його кутах. *На нахиленому знімку*

кола малих паралелей зобразяться асиметричними еліпсами, а більших гіперболами та дугами. Меридіани зобразяться прямими лініями, що виходять не з головного пункту знімку ***O***, а з надиру ***n***. Така ситуація ускладнює процес вимірювального опрацювання нахилених знімків, а тому їх стараються виправити чи привести до потрібної картографічної проекції, тобто *ректифікувати*. Цю процедуру можна виконати з плівковими кадрами на фототрансформаторах, а для електронних зображень – за допомогою комп'ютерних програм.

Для полегшення виявлення відхилень зображення знімка від оптимальних умов знімання на всіх кадрах вже під час знімання реєструються типові параметри, а саме: рамка кадру з центровими мітками та з вдрукованим положенням вертикального водяного рівня, який дає змогу одразу визначити наявність і величину відхилення візирної осі від прямовисної лінії; зображенням годинника або інший спосіб для визначення часу знімання; показник радіовисотоміра (висота над поверхнею землі), дата, фокусна віддаль камери, номер негатива, номер кадру, тривалість експозиції та ін. По площині знімка можуть бути зображені невеликі хрестики, що контактно віддрукувалися від вирівнювальної пластини плівкового стола фотоапарата, які використовують для суміщення різних кадрів багатозональної камери і корекції масштабу. Крім того, в позарамковій частині плівки видруковується денситометрична шкала, яка дає змогу оцінити правильність відтворення фототонів (рис. 4.17).

Так само необхідними є перетворення знімків з технічними спотвореннями, наприклад, розмитістю зображення, повторними контурами. Проте таких знімків краще уникати.

*Перетворення геометричні, зокрема, перетворення масштабу* дають змогу здобути скриту інформацію. Наприклад, якщо фотоплівка має роздільну здатність 30 ліній на 1 мм, то в межах цього міліметра можуть зобразитися деталі, які для "неозброєного" людського ока недоступні. Тим більше це стосується такої якості зображень, яка властива для знімків з МКФ-6 – 100–160 ліній на 1 мм. У таких випадках збільшення масштабу зображень стає не просто заходом для поліпшення зручності користування зображенням, а необхідним процесом – перетворенням з метою виявлення прихованої інформації.

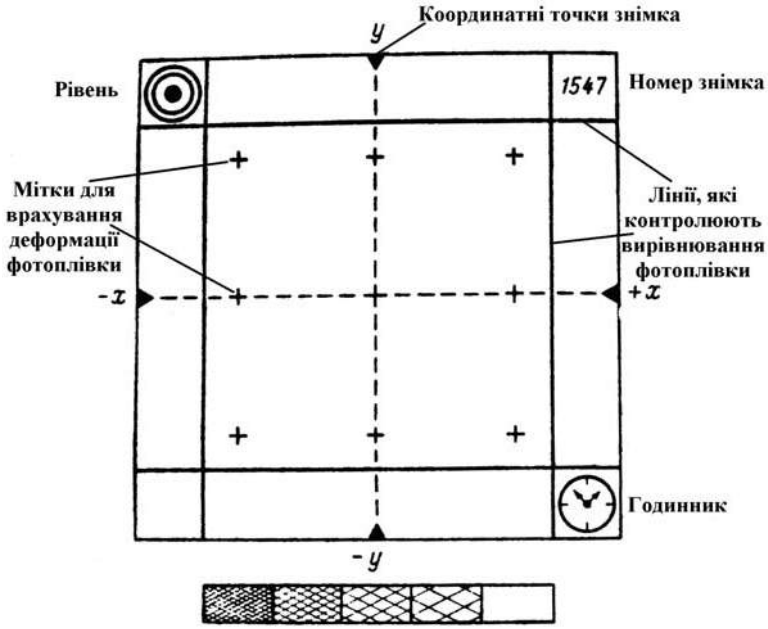



Рис. 4.17. Фонова рамка кадру аерофотознімка.
Внизу – денситометрична шкала[4].

### *Фотохімічні способи перетворення*

Матеріали фотографічного знімання можна вважати практично сформованими вже відразу після експозиції плівки. Проте інформація на плівці є прихованою, і її ще потрібно “викликати” чи проявити. Тому процес опрацювання плівок з дистанційною інформацією продовжується вже в лабораторія, куди доставляють відзнятий матеріал.

Експоновані плівки проявляють у спеціальних хімічних розчинах, від підбору хімічних реагентів у яких залежить результат формування зображення на плівках.

Процес опрацювання чорно-білої негативної фотоплівки у водних хімічних розчинах має таку послідовність: проявлення, промивання, фіксування, друге промивання, сушіння. До сушіння цей процес відбувається в повній темноті з дотриманням часових

[4] Денситометрична шкала – шкала щільності фототонів.

інтервалів і температурних режимів кожного процесу. Важливим є підбір хімікатів.

У процесі проявлення зачеплені дією світла світлочутливі кристали галогенідів срібла під дією метолових, гідрохінонових чи фенідонових проявників перетворюються в металічне срібло і чорніють. Густота "почорніння" залежить від кількості "атакованих" фотонами і металізованих кристалів, що є в емульсії фотоплівки. Чим більше світла поступило на якусь ділянку плівки, тим сильніше почорніння воно викличе під час проявляння. Так створюється "негативне" зображення: світлі в природі об'єкти виглядатимуть темними, навпаки. Однак цього перетворення добре не видно, доки на плівці залишатимуться всі шари емульсії (особливо протиореольний) і поки не буде з плівки виведено решту емульсії, яка не була задіяна в фотохімічному перетворенні. Для цього застосовують процес промивання та "закріплення" зображення розчином тіо-, чи гіпосульфіту натрію. Ці реагенти розчиняють і виводять з емульсії плівки всі компоненти, крім "почорнілих". Після цього плівка вже стає нечутливою до світла і робиться майже прозорою в неосвітлених місцях, де не сформоване зображення. В описаному процесі потрібно точно витримувати технологію, бо виправляти проявлену плівку майже неможливо. При надто теплій температурі розчинів і води емульсія розбухає і може змитися, залишивши лише целулоїдну основу. У проявниках, холодніших на 1–2° С, процес триває довше, а результат контрастніший, при дещо завищеній температурі розчинів плівки – стають вуальними, сірими. В процесі хімічної обробки емульсія стає дуже піддатливою до механічних дій, навіть до ненормового руху води. Важливими також є умови висушування плівки – він не повинен бути надто пришвидшеним.

Складнішим і довшим є процес хімічного опрацювання кольорових негативних та позитивних плівок, бо містить, крім чорно-білого проявляння, ще кольорове проявляння та засвітлення і "відбілювання", кілька стацій промивання.

Уже готові фотоплівки не повинні піддаватися жодним трансформаціям, бо вони є первинними оригіналами.

Експерименти над зображеннями та різне їхнє перетворення можна робити з копіями цих зображень. Виготовляють так звані дубль-негативи та дубль-позитиви. Зокрема, потрібно знати, що

кожна наступна копія (копія з оригіналу, копія з дубля, копія з копії наступних порядків) супроводжується втратою інформації, а також її тоновим та площинними спотворенням.

Над дубль-позитивами, чи дубль-негативами[5] можна робити різні перетворення, в тім числі й фотохімічні. До них належать ослаблення надто темних негативів, підсилення надто світлих негативів, вирівнювання контрастності, підсилення контрастності, ретельне пророблення дрібних елементів зображення, застосування методів "голодного проявлення", ізогелії[6], квантування[7] і т. п. Ці роботи під силу спеціалістам з великим досвідом роботи в хімічному опрацюванні фотоматеріалів. З негативів можна виготовляти безліч позитивів і застосувати в процесі їхнього виготовлення найрізноманітніші перетворення.

*Світлопроекційне збільшення* розміру фотокадрів є значним, але найбільш доступним і поширеним перетворенням. Його застосовують до плівок, що мають малий формат кадру[8], або й для більших форматів, коли бажають виділити та деталізувати якусь частину зображення. Кратність збільшення залежить від потреби й можливостей, але обмежується структурою емульсії фотоплівки, допоки не проявиться зернистість емульсії плівки, бо зображення зерен призводить до змішування інформації від об'єкта знімання і від структури самої плівки. Зазвичай, кратність збільшення на фотозбільшувачах вкладається в межах 3–10, але під час проектування слайдів на екран досягається кратність у десятки

---

[5] Ці дублі варто вважати частково трансформованими.

[6] Ізогелія – спосіб фотодрукування, за якого досягають розбиття (розкласифікація) півтонів зображення на ділянки, що мають однакову "світлість" – однаковий фототон. Зображення в цьому випадку має менше фототонів, але стає ніби ілюмінованим ступінчастими фототонами, як рельєф на кольоровій карті. Тепер цей спосіб частіше замінюють комп'ютерним розділенням фототонів зображення.

[7] Квантування – спосіб перетворення зображення за допомогою квантувального пристрою, коли найбільш виразно зображаються тільки об'єкти, або їх групи, що мають певну оптичну щільність і становлять інтерес дешифрування, а решта зображення – "приглушене", фонове.

[8] Найпоширенішим розміром аматорських фотоапаратів є 24×36 мм, але й 13×17, 18×24. 4×6см, 6×6 см, 6×9см. Формат кадру фотокомплексу МКФ-6 має розмір 55х81мм при загальному розмірі негатива 70×91мм.

і сотні разів. Високі кратності збільшення можна застосовувати до дрібнозернистих плівок. Для одного типу плівки характерне правило: чим менша зернистість плівки, тим менша її світлочутливість. Проте саме дрібнозернисті плівки застосовують для знімання об'єктів з дрібними деталями, в тім числі й для знімань на великих віддалях від об'єкта знімання.

У разі збільшення кадрів фотоплівок використовують світлові проектори, сканери, фототрансформатори чи інші пристрої. Під час збільшення фотокадрів правильних планових знімків[9] важливо витримувати паралельність фотоплівки в рамці фотозбільшувача до його проекційного стола. Інакше – не оминути внесення нових спотворень. Якщо ж знімок був зробленим з відхиленням візирної осі фотокамери від лінії надиру, то його під час збільшування можна трансформувати (див нижче).

Для фіксації збільшеного фотопроекторами зображення застосовують спеціальні фотоплівки, чи фотопапір, а також фотографування отриманого зображення повністю, чи окремих його частин.

*Фотометричні перетворення* полягають у зміні оптичної щільності оригінального знімка, внаслідок чого можна отримати нове зображення з наперед завданими фотометричними характеристиками, які вважаються найсприятливішими для певних задач дешифрування.

Часто вживаним фотометричним перетворенням є *збільшення чи зменшення контрастності* зображення (*метод контрастування*). Контрастність знімків залежить не тільки від застосованих фотоматеріалів, режимів фотографування, а й від самого об'єкта фотографування. Зокрема, під час знімання гір, частково покритих снігами та льодовиками, які мають високу яскравість, непокриті снігом поверхні можуть зобразитися надто чорними, що позбавляє можливості розрізнити їхні важливі деталі. Такою ж небажаною є монотонність глиняних пустинь, де не вдається розрізнити деталі, які мало відрізняються за яскравістю, але є важливими елементами території.

Змінити контрастність знімків можна їхнім копіюванням відповідно на "м'які", або контрастні і дуже контрастні фотоматеріали,

---

[9] У цьому випадку йдеться про те, що для збільшення вставлено знімок місцевості без відхилення візирної осі фотокамери від лінії надиру.

з наступним їхнім опрацюванням відомими лабораторними хімічними способами, що додатково підсилять бліді зображення, або послаблять надмірно контрастні зображення, щільність фототону в надто темних місцях, пророблять і підсилять деталі в світлих місцях зображення. Досягти ретельного пророблення деталей можна також поєднанням процесу експонування, закріпленого на проекційному столі знімка, з частковим його проявленням. Тоді відразу проявляться найяскравіші деталі і під час повторного експонування вони не будуть реагувати на додаткове світло, а темні деталі зможуть отримати тривалу експозицію і краще проявлення.

*Кольорове контрастування* застосовують за потреби полегшення інтерпретації кольорових знімків. При цьому застосовують метод кольорової фільтрації, коли за допомогою кольорових світлофільтрів приглушують деякі кольори і виділяють потрібні. При цьому складнокольорові зображення отримують насичені кольори, але втрачаються деякі перехідні фототони. Цей спосіб можливий у виконанні фотохімічному, але зараз краще застосовувати комп'ютерні програми кольорового контрастування. Застосування контрастованих кольорових зображень приводить до легшого прочитання та інтерпретації складнокольорових та складнокомпозитних зображень.

Зазначені перетворення знімків способами *ізогелії, квантування, еквіденситне*[10] *опрацювання та кластерний аналіз за текстурними ознаками* також належать до фотограмметричних перетворень, але їх сьогодні застосовують не фотохімічними способами, а із застосуванням комп'ютерних програм.

Іноді застосовують *монохромування* чорно-білих зображень, тобто подачу його відтінками обраного кольору способом введення в світловий потік під час проектування зображень кольорових світлофільтрів потрібної якості. Цим самим можна повніше використати чутливість людського ока до хвиль певних кольорів.

Важливим способом перетворення знімків є *синтезування* кольорових зображень з вихідних чорно-білих негативів. При цьому

---

[10] Всі ці способи спрямовані на розділення фототонів зображення за належністю до певних величин, класів,"ступеней", іноді з легким оконтурюванням фототонів виділених класів (із застосуванням копіювання зображень на плівку "Агфаконтур").

використовують можливість адитивного[11] накладання світлових потоків основних кольорів, просвітлених через чорно-сіро-біле зображення фотоплівок, яка дає змогу отримати зображення в основних та всіх додаткових кольорах. Цей спосіб може бути застосованим лише до знімків, зроблених багатозональними камерами, коли одна і та ж поверхня була сфотографована синхронно кількома фотокамерами, кожна з яких фіксувала фотохвилі певної довжини. Зокрема, потрібно використовувати спеціально для цього створені мультиспектральні проектори (див. опис приладів для перетворення знімків). Можливість працювати з кольоровими знімками значно розширює використання фізіологічного ресурсу зорового аналізатора людини під час роботи з одним зображенням. Крім того, спеціально створений апарат МСП-4 для створення таких зображень дає змогу з одного комплекту (з чотирьох кадрів) чорно-білих знімків створити тисячі варіантів синтезованих кольорових зображень, і кожен з них може виявитися оптимальним для тих чи інших завдань дешифрування.

*Процедури електронного перетворення знімків* найчастіше застосовують до знімків телевізійних та сканерних або сканованих фотознімків. Їх використовують для поліпшення якості інформації. Найчастіше застосовують методи *фільтрації та корекції*. Вони призначені для усунення різного роду дефектів систематичного та випадкового характеру.

*Фільтрацією* називають селективне опрацювання даних шляхом розкладу їх на компоненти з наступним видаленням спотвореної інформації. Такі перетворення доступні тільки фахівцям з великим досвідом роботи з електронною інформацією.

*Процедури стиснення і кодування* спрямовані на підвищення ефективності передачі та збереження, а також опрацювання електронної інформації. Це можливе шляхом деякого скорочення обсягу інформації через вилучення інформації про параметри знімання, взаємозв'язки між каналами багатозонального знімання, зменшення надмірної для певних потреб деталізації в просторі і фототонах. Це вилучення майже не позначається на якості зображення і результатах дешифрування, особливо, якщо воно

---

[11] Адитивний – (лат.) – пов'язаний з додаванням – в цьому аспекті – з оптичним додаванням кольорів.

ведеться не автоматично, а з участю людини. Найчастіше застосовують алгоритми так званої диференціальної імпульсно-кодової модуляції (ДІКМ). Зазначені методи виконують з використанням спеціальних комп'ютерних програм. Можливими є також ті види стиснення інформації, які застосовують усі, хто працює із зображеннями в комп'ютерах, використовуючи стандартні опції програм опрацювання зображень.

## 4.5. Види вимірювань на знімках

У процесі інтерпретації знімків (аерофото- і великомасштабних космознімків) можуть бути визначені різні кількісні характеристики об'єктів. Головними видами параметричних досліджень, які застосовують у практиці географічних досліджень, є: вимірювання довжин ліній, визначення площ, вимірювання висот окремо розташованих об'єктів, визначення крутизни схилів.

Метричні властивості знімків і використання їх з метою вимірювань вивчає наука *фотограмметрія* або вимірювальна фотографія. Вона розвинулася з поширенням наземного фотографування, а особливо аерофототопографічних знімань. Знімання одного об'єкта з двох точок простору і вимірювання, пов'язані з цим, спричинили розвиток стереофотограмметрії. Фотограмметрія стала самостійною науковою дисципліною, досягнення якої використовували для аерофототопографічного виробництва карт.

### *4.5.1. Визначення масштабів*

Перш ніж виконувати будь-які вимірювання об'єктів на космічному чи аерофотознімку потрібно визначити його *масштаб*, оскільки він залежить від низки чинників і не є постійним, як на топографічних картах. Головними чинниками, які впливають на масштаб є нахил знімка, висота фотографування і рельєф місцевості, а також особливості знімальної апаратури.

Зазначимо, що масштабом горизонтального космо- чи аерофотознімка є відношення якого-небудь відрізка на знімку до відповідного відрізка на місцевості (рис. 4.18). Горизонтальний аерофотознімок отримують тоді, коли кут нахилу оптичної осі

аерофотоапарата (тобто лінії, що проходить через об'єктив перпендикулярно до площини негатива) дорівнює нулю, тобто візирна вісь є націленою в пункт надиру. На практиці важко витримати ідеально горизонтальне положення, кут нахилу, зазвичай, становить від 20–30° до 2–3°. Такого типу знімки є плановими. Це космічні знімки та більшість аерофотографічних. У випадку, коли для знімання задають достатньо великий кут нахилу – 20–45°, аерофотографування означують як перспективне. Для кожного із зазначених видів знімків масштаб відрізнятиметься.

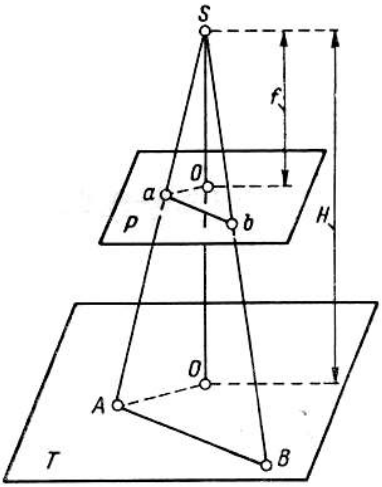



Рис. 4.18. Масштаб зображення як відношення відрізка на знімку *ab* до відрізка на місцевості *AB*:
*P* – площина знімка,
*T* – територія, яку фотографують;
*S* – центр проекції (об'єктив фотоапарата), *SO* – оптична вісь фотоапарата, яка вертикальна і перпендикулярна площинам *P* і *T*; *f* – фокусна відстань об'єктива, *H* – висота фотографування.

*Масштаб для планових і горизонтальних знімків* рівнинної місцевості за наявності карти визначають за формулою:

$$\frac{1}{m_z} = \frac{l_z}{L_k \cdot M_k} \quad \text{або} \quad m_z = \frac{L_k \cdot M_k}{l_z},$$

де $L_k$ – довжина лінії на карті, $M_k$ – знаменник масштабу карти, $l_z$ – довжина лінії на знімку. Визначаючи масштаб, вимірюємо ідентичні відрізки на карті і знімку, за їхнім відношенням знаходимо масштаб. Ці відрізки треба брати в центральній частині знімка у різних напрямах. Для більшої точності цю операцію повторюють кілька разів. Чим більший масштаб карти, тим точніші відрізки для обчислень можна на ній провести. Проте для зменшення помилок в обчисленнях вибирають карти і знімки рівних масштабів. Такий спосіб визначення масштабу застосовують для фотографічних дистанційних матеріалів.

Під час польового дешифрування масштаб планового знімка знаходять за відношенням довжини лінії (*ab*) на знімку до дожини лінії (*AB*) на місцевості (див. рис. 4.18.):

$$\frac{1}{m_z} = \frac{ab}{AB}.$$

Довжину лінії на місцевості визначають за відстанню між двома геодезичними пунктами з відомими координатами, розв'язуванням оберненої геодезичної задачі, або використовують лічильник відстаней на спідометрі автотранспорту. Помилка визначення масштабу буде тим меншою, чим довший вибрали відрізок *ab*. Якщо *AB* взяли дуже довгим, то його визначення може бути проблематичним.

Існує ще один спосіб визначення масштабу фотографічного планового знімка. Якщо місцевість є горизонтальною площиною, а оптична вісь аерофотоапарата перпендикулярна до неї, то масштаб буде однаковим по всьому знімку. Його знаходять за формулою:

$$\frac{1}{m_z} = \frac{f}{H},$$

де $f$ – фокусна відстань аерофотоапарата, $H$ – висота фотографування. В реальному випадку місцевість не є горизонтальною площиною, має взаємні перевищення точок, і тому масштаб знімка не буде однаковим в усіх його частинах. Це наслідок різної висоти фотографування над додатними і від'ємними формами рельєфу. Всі точки місцевості, що лежать в одній горизонтальній площині, зобразяться на знімку в одному масштабі, тоді як точки місцевості, які лежать в іншій площині, будуть мати інший масштаб. Його визначають окремо для певного набору точок місцевості:

$$\frac{1}{m_1} = \frac{f}{H - H_1} \quad \text{і} \quad \frac{1}{m_2} = \frac{f}{H + H_2},$$

де $f$ – фокусна відстань об'єктива, $H$ – висота фотографування над середньою площиною місцевості, $H_1$ – висота фотографування вище від середньої площини, $H_2$ – висота фотографування нижче середньої площини. Дану формулу використовують під час знаходження масштабів фотографічних дистанційних матеріалів для територій з відомими гіпсометричними рівнями.

Зазначимо, що фокусну відстань об'єктива визначають як відстань від площини знімка до центра фотографування. Її величина

постійна для даного аерофотоапарата. Відстань від об'єктива до земної поверхні є висотою фотографування повітряних носіїв, яка для рівнин переважно становить 5 км і 8 км – для гір. Висота фотографування зберігається незмінною під час знімання рівнинної місцевості, оскільки є малими спотворення в межах кожного знімка через рельєф.

З останньої формули видно також, що при заданому масштабі знімання висота фотографування зростає зі збільшенням фокусної відстані об'єктива фотокамери. З іншого боку, при постійній висоті фотографування масштаб знімків тим дрібніший, чим менша фокусна відстань об'єктива.

Точність визначення масштабу залежить від точності визначення висоти фотографування. Якщо її визначають за допомогою радіовисотоміра, то помилка незначна, якщо за допомогою барометричного висотоміра, то точність є малою. Зокрема, висоту знімання в 1 км визначають з помилкою до 50 м, відносна помилка визначення масштабу при цьому досягає 5%.

На сканерних, теплових і радарних знімках зображення побудоване за законами, що відрізняються від звичайної фотографії. Масштаб цих зображень, по суті, постійний у напрямі польоту, якщо висоту і швидкість витримують постійними. У поперечному напрямі зображення має змінний масштаб. Масштаб радіолокаційних знімків визначають параметрами знімальної апаратури, і він не пов'язаний з висотою знімання. Масштаб телевізійних знімків, окрім висоти фотографування, ще й залежить від параметрів передавальної і приймальної апаратури.

*Обчислення масштабів для перспективних знімків*, оптична вісь яких нахилена під кутом до площини знімання, відрізняється від обчислень для горизонтальних і планових знімків. При цьому зображення спотворюється через різномасштабність, яка виникає. Різномасштабність призводить до деформацій форм контурів. У разі значного нахилу знімків виникає видима перспективність зображення (рис. 4.19).

Масштаб, який дорівнює відношенню фокусної відстані об'єктива камери до висоти фотографування, на нахиленому знімку зберігається тільки вдовж лінії неспотворених масштабів $h_c h_c$, яка охоплює точку неспотворених масштабів $c$. Вздовж інших ліній, паралельних $h_c h_c$, масштаб зберігається однаковим

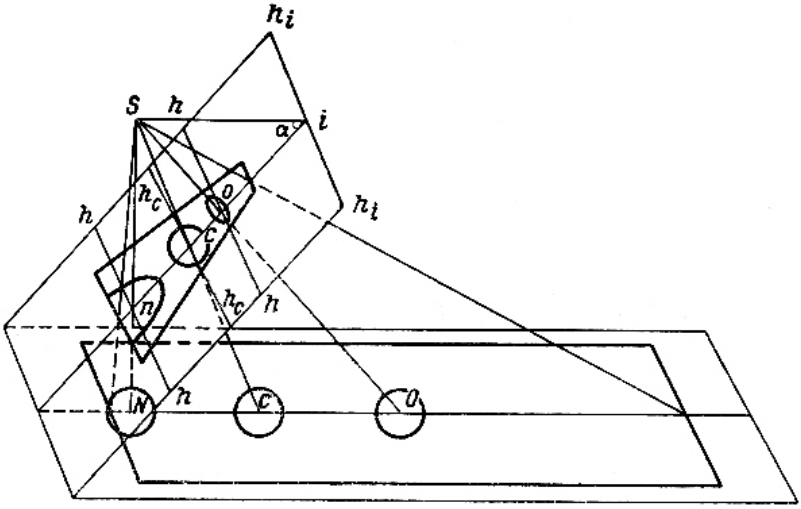



Рис. 4.19. Утворення перспективного зображення на нахиленому знімку:
*S* – центр проекції(об’єктив фотоапарата), *So* – оптична вісь фотоапарата або фокусна відстань фотоапарата *f* або головний проектувальний промінь, *SN* – висота фотографування *H* або прямовисний промінь проектування, *OCN* – лінія напрямку знімання, *SC* – бісектриса кута *OSN*, *o* – головна точка знімка на перетині головного проектувального променя і площини зображення, *c* – точка нульових спотворень на перетині бісектриси кута *OSN* і площини зображення, *n* – точка надиру на перетині прямовисного проектувального променя і площини зображення, це точка сходу всіх вертикальних ліній місцевості; *i* – головна точка сходу на знімку всіх прямих ліній місцевості, паралельних *OCN*; $h_ih_i$ – лінія дійсного горизонту, яка при малих кутах нахилу виходить далеко за межі знімка; $h_ch_c$ – лінія неспотворених масштабів, що проходить через точку неспотворених масштабів *c*, *hh* – лінії спотворених масштабів; а – кут між площиною знімка і площиною місцевості.

вздовж цих ліній, але різний для кожної з них. Уздовж всіх ліній, що не паралельні *hh*, масштаб буде різним. Для фотографічних видів знімання його визначають за схожими формулами, що й для горизонтальних і планових знімків, але як і висоту знімання, вибирають відстань до об’єкта по нахиленій лінії.

*Масштаби знімків на цифрових носіях* визначають, з урахуванням їхньої роздільної здатності, з якою прямо пов’язані дешифрувальні властивості знімків. *Роздільну здатність* оцінюють за

величиною об'єктів, які роздільно читаються в одному пікселі зображення. Чим більша детальність зображення, тим дрібніші об'єкти відображені на знімках. За детальністю зображення цифрові знімки класифікують так:

– знімки низької роздільної здатності (розміри об'єктів – кілометри/піксель);
– знімки середньої роздільної здатності (десятки метрів/пікс);
– знімки високої роздільної здатності (одиниці метрів/пікс);
– знімки надвисокої роздільної здатності (1 м і менше/пікс).

Роздільна здатність та масштаб мають різне співвідношення. Зокрема, космознімки з роздільною здатністю 5 м відповідають масштабам 1:25 000, роздільна здатність у 30 м відповідає масштабам 1:100 000, однокілометрова роздільна здатність знімків – це масштаб 1:1 000 000 (табл. 4.1).

*Таблиця 4.1.*

Масштаб космічних зображень
з різних супутникових сканувальних систем

| Давачі на супутниках | Роздільна здатність, м/пікс | Можливий масштаб |
|---|---|---|
| Landsat 7 ETM+ | 15 | 1:100 000 |
| SPOT 1-4 | 10 | 1:100 000 |
| IRS-1C I IRS-1D | 6 | 1:50 000 |
| SPOT 5 | 5 | 1:25 000 |
| EROS | 1,8 | 1:10 000 |
| OrbView-3 | 4 | 1:20 000 |
| OrbView-3 | 1 | 1:5 000 |
| IKONOS | 4 | 1:20 000 |
| IKONOS | 1 | 1:5 000 |
| Quickbird | 2,44 | 1:12 500 |
| Quickbird | 0,61 | 1:1 500 |

Масштаб космо- й аерофотознімків визначає різний рівень генералізації об'єктів, які зображають, що дає змогу використовувати їх для вирішення різноманітних завдань та розроблення різномасштабних тематичних карт. Досвід географічних дистанційних досліджень дає змогу нам класифікувати аерофото- і космічні знімки за масштабами. Аерофотознімки поділяємо на:

– дуже дрібного масштабу – більші 1:100 000;

– дрібного масштабу – 1:100 000–1:36 000;
– середнього масштабу 1:35 000–1:15 000;
– великого масштабу – 1:14 000–1:1 000;
– дуже великого масштабу – 1:1 000 і більшого.

Космознімки класифікуємо на чотири групи, які відповідають чотирьом рівням генералізації зображення:

– глобальному – дуже дрібний масштаб – 1:10 000 000 і менші;
– регіональному – дрібний масштаб – 1:10 000 000–1:1 000 000;
– субрегіональному – середній масштаб – 1:1 000 000–1:100 000;
– локальному – середній масштаб – 1:100 000 – 1:50 000;
– детальному рівню генералізації – великий масштаб – 1:50 000 і більші.

### *4.5.2. Вимірювання довжин ліній*

Одним із видів вимірювань на аерофото- і космічних знімках є вимірювання довжин ліній. Це визначення на знімках є достатньо точним, документальним і доказовим. Вихідною є формула з обчислення масштабу

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} = \frac{l}{L},$$

де $L$ – довжина лінії на місцевості, $l$ – довжина лінії на знімку, $H$ – висота знімання, $f$ – фокусна відстань. Під час роботи з аерофотознімками, які мають кут нахилу менше ніж 3є, а місцевість є близькою до горизонтальної, довжини ліній визначаємо за формулою:

$$L = l\frac{H}{f}\cdot$$

Точність визначення довжин ліній на місцевості залежить від:

1) точності виміру на знімку (яка може коливатися в межах ± 0,2 мм);

2) правильності визначення висоти знімання, яке проводять радіовисотометром.

Помилка при цьому становить ± 2 м. На відміну від зазначених, показники фокусної відстані $f$ відомі з високою точністю. Звідси випливає, що помилка вимірювання лінії тим менша, чим довша вимірювана лінія і більша висота фотографування.

Підставляємо в останню формулу $\frac{H}{f} = m$, отримуємо:

$$L = lm,$$

де $m$ – знаменник масштабу знімка, $l$ – довжина лінії на знімку. Точність вимірювання довжин ліній у цьому випадку залежить від точності визначення масштабу знімка. Його для більшої достовірності вимірювань обчислюють у центральній і периферійній частинах зображення.

Реальні знімки мають спотворення через нахил знімального апарата, який може коливатися від 30′ до ~1–2°. Спотворення виникають також через вплив рельєфу, а на космічних знімках ще й через кулястість Землі. Є низка формул, за якими обчислюють ці спотворення. За цими формулами відносні помилки вимірювань тим більші, чим більший кут нахилу знімка і більші відносні перевищення рельєфу (табл. 4.2):

*Таблиця 4.2.*

Наближені значення помилок вимірювання

| Відносні перевищення рельєфу, h/H | 1/15 | 1/50 | 1/100 | 1/250 |
|---|---|---|---|---|
| Кути нахилу знімка, в град. | 6 | 3 | 2 | 2 |
| Відносні помилки через рельєф, % | 8 | 2 | 1 | 0,4 |
| Передбачувані помилки, % | 10,4 | 2,6 | 1,7 | 1,7 |
| Фактичні помилки, %: контактні відбитки | 17 | 4 | 2,5 | 1 |
| Збільшені знімки (1:2) | - | 3 | 1,6 | 0,7 |

У разі малих перевищень рельєфу фактичні помилки менші, ніж передбачувані, за великих – перевищеннях рельєфу довжини ліній визначають досить наближено. Робота на збільшених знімках знижує помилку вимірювань. Для географічних досліджень точність вимірювань не повинна перевищувати 10–15%. Щоб зменшити помилки вимірювань, використовують збільшувальні прилади.

### *4.5.3. Визначення площ об'єктів на знімках*

На горизонтальних знімках і плоскій місцевості площі ділянок на аерофото- і космічних знімках визначають тими ж способами і приладами, які використовують для визначення площ за картами.

Якщо масштаб знімка $m$ відомий, то площу фігури $S$ на місцевості визначаємо за формулою

$$S = sm^2,$$

де $S$ – величина площі ділянки на знімку.

Площі контурів, які вимірюють безпосередньо на знімках, містять помилки, зумовлені різними причинами. Загальна помилка визначення площ за дистанційними матеріалами ґрунтується на окремих помилках, зумовлених впливом: нахилу аерофото- і космічних знімків, рельєфу місцевості, кулястості Землі (для космічних знімків), неточного визначення масштабу, неточного впізнавання і нанесення контурів, деформації фотоматеріалів, недосконалості способів вимірювання площ.

1. Помилка через нахил знімка. Якщо би вона була єдиним чинником, який спотворює масштаб, то досить би було ввести поправку.

Відносну помилку визначення площі $S$ фігури, довільно розміщеної в межах знімка, обчислюємо за формулою:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{3y}{f}\sin\alpha,$$

де $\Delta S$ – абсолютна помилка визначення площі, а – кут нахилу знімка, $f$ – фокусна відстань, $y$ – ордината центра фігури, або ордината центру знімка відносно лінії неспотворених масштабів (якщо $y = 0$, то помилка = 0, або якщо об’єкт розміщений в центрі знімка, то це ідеально для вимірювання). З формули випливає також, що помилки вимірювань зменшуються зі збільшенням фокусної віддалі аерофотоапарата і збільшуються зі збільшенням кута нахилу та зі збільшенням ординати $y$. По суті, це означає, що для вимірювань треба вибирати знімки, де контур розміщений симетрично відносно центру знімка. Чим дальше центр об’єкта від точки нульових спотворень, тим більше спотворена його площа (табл. 4.3).

*Таблиця 4.3.*

Деякі відносні помилки вимірювань площ на знімках

| Площа об’єкта, га | Помилка через розміщення на знімку, % | | Площа об’єкта, га | Помилка через кут нахилу знімка, % | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Положення на краю | В центрі знімка | | а = 6° | а = 1° |
| до 25 | 12 | 4 | 10 | 5,0 | 2,7 |
| 25–50 | 9 | 5 | 10–25 | 5,7 | 2,3 |
| 50–100 | 6 | 5 | 25–50 | 6,2 | 2,1 |

За даними таблиці, спотворення визначення площ за нахиленими знімками зростають зі збільшенням кута нахилу знімка. В середньому вони можуть досягати 5–10% . Для їхнього зменшення знімки трансформують, а площі визначають за зонами, в межах яких зміни масштабу порівняно малі. У ГІС-програмах для обробки дистанційних зображень передбачено ортофототрансформування, яке усуває зазначені види помилок і дає змогу точно проводити вимірювання об'єктів.

2. Помилка через вплив рельєфу. Вплив рельєфу носить безсистемний характер і не піддається точним обчисленням. Ідеальний, але досить рідкісний випадок, коли контури, що вимірюються лежать на двох горизонтальних площинах з різницею висот $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$. Помилка визначення площі становить:

$$\frac{\Delta S}{S} = 2\frac{\Delta h}{H},$$

де $\Delta h$ – перевищення рельєфу, $H$ – висота фотографування. Тобто, нахил місцевості формує такі ж спотворення, як і нахил знімка. У гірській місцевості рельєф суттєво знижує точність вимірювань порівняно з рівниною (табл. 4.4).

*Таблиця 4.4.*

Відносна помилка вимірювань площі фігури на знімках через рельєф місцевості

| Площа об'єкта, га | Помилка через рельєф, % | |
|---|---|---|
| | рівнини | гори |
| до 50 | 1,3 | 7,5 |
| 50-100 | 1,2 | 6,0 |

Величина помилки зменшується, якщо фігура вибрана симетрично відносно центра знімка. Більші помилки площ малих об'єктів пояснюють тим, що їхні центри розташовані ближче до країв знімків.

Площа об'єктів спотворюється в тому випадку, коли через рельєф відбувається зміщення їхніх границь. Якщо границя фігури лежить всюди на одній висоті, то похибок через рельєф не повинно бути, хоч всередині неї можуть бути різні місцеві спотворення. Варто розрізняти спотворення, які вносяться мікро-, мезо- і макрорельєфом. Мікрорельєф багаторазово зміщує контур від

ділянки до ділянки, але можна наближено вважати, що спотворення компенсуються. Якщо контур розташований на похилій площині, то його можна розглядають як звичайний похил знімка. Найбільші труднощі виникають, коли контур лежить в межах двох елементів рельєфу, де контур розташований на різно орієнтованих схилах (тобто площа при цьому розтягується вдвічі). У цьому випадку об'єкт розбивають на окремі частини, границі яких узгоджені з перегинами рельєфу, і визначають площі окремо для кожної з частин.

3. Під час вимірювання площ на космічних знімках виявляється помилка обчислень через кулястість Землі. Спотворення площі фігури, розміщеної симетрично відносно центра горизонтального знімка, розраховують за формулою

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{r^2 H}{R f^2},$$

де $r$ – відстань точки знімка від його головної точки $O$, $H$ – висота знімання, радіус Землі $R$ = 6 371 км, $f$ – фокусна відстань об'єктива. Наприклад, під час фотографування з космосу з висоти 300 км камерою з $f$ = 100 мм площа об'єктів, розташованих на краю знімка ($r$ = 100 мм), вимірюватиметься з відносною помилкою 2 %.

4. Помилка через неточно визначений масштаб. Вона залежить від способу визначення масштабу. На практиці часто трапляється, що масштаб знімків зазначають без даних про $f$ і $H$. Тому він є наближеним і значно впливає на точність визначення площ. Більш точним є спосіб визначення площ за співвідношенням довжин ліній. Цей спосіб дає фактичний масштаб знімків з урахуванням деформацій фотопаперу. Помилка у вимірюванні контурів при цьому не більша 0,2 мм. Чим довший відрізок, тим точніше визначений масштаб.

5. Помилка через впізнавання границі об'єкта. Для добре впізнаваних границь, враховуючи помилки викреслювання, спотворення оцінюють приблизно в 0,15 мм; для важко впізнаваних – 0,2–0,6 мм. Помилки цього виду зумовлені нечіткістю, розмитістю границь природних об'єктів або тим, що їхні межі можуть бути частково закриті іншими об'єктами, наприклад, границя поля може бути перекрита тінню від сусіднього лісового масиву. Чим більша площа об'єкта, тим менша помилка через нанесення контурів.

6. Помилка через деформацію фотоматеріалів. Дослідним методом визначено, що на негативах більша точність вимірювань. Деформації площі для фотоплівки становлять 0,3–1%, для фотопаперу – 0,8–1,5%. Впливає на деформацію також час зберігання фотоматеріалів, при цьому взаємний вплив їхньої деформації і часу зберігання спричинює спотворення від 1 до 2,5 %.

7. Помилка у власне способах вимірювання площ. Площі криволінійних фігур вимірюють планіметром чи палеткою. Спотворення зумовлюють: а) неспівпадіння обвідного шпиля з початковою точкою на початку і вкінці обводу; б) помилка відліків; в) вплив механічних похибок приладу; г) вплив помилки обводу; д) неправильне визначення ціни поділки. Проте технічні помилки, що виникають через метод та інструмент вимірювання, менші від тих помилок, які виникають через спотворення на знімках. Тому визначення площ на знімках можна проводити спрощеними способами: одним-двом обводом планіметром чи палеткою. Проте так визначають площі, більші ніж 10 см$^2$, у масштабі знімка, а менші – під час декількох обводах планіметром.

Загалом сумарна помилка вимірювань площ об'єктів на знімках складається із таких значень: нахил знімка – 1,4 %; вплив рельєфу – 0,5 %; неточне визначення масштабу – 1,0 %; неточне впізнавання контурів – 0,5 %; технічні помилки – 0,8 %. *Сумарна* помилка становить 4,2 %.

Отже, коли помилки через нахил знімка і рельєф незначні, то площі визначаються з великою точністю. Помилки у вимірюваннях суттєво впливають на результати деяких географічних досліджень, наприклад, під час визначення змін поширення того чи іншого явища чи процесу. Тут застосовують знімки різних часових зрізів і важливо провести точні вимірювання, щоб забезпечити достатню достовірність даних. Якщо на одних знімках через спотворення виходить один результат, а на других – інший, то важко порівняти параметри вимірюваних об'єктів і дійти висновків про їхні зміни.

### *4.5.4. Вимірювання висот об'єктів*

На знімках проводять вимірювання об'ємних тіл, об'єм яких отримують унаслідок встановлення стереоефекту. Окремий фотознімок дає нам один напрям на кожну точку предмета в просторі від центра проекції, але не про

положення самої точки в просторі. Оскільки точка в просторі утворюється від перетину двох променів, необхідно мати два фотознімки об’єкта, одержані з двох точок знімання. Такі фотознімки називаються стереопарою. Зменшене об’ємне (рельєфне) відображення місцевості на стереопарі називають *стереомоделлю*. У географічних дослідженнях на стереомоделі виконують декілька видів вимірювань, зокрема, визначають висоти і глибини об’єктів, крутизну схилів, перевищення висот.

Вимірювання висот окремих об’єктів на аерофотознімках проводять способами: 1) за різницями поздовжніх паралаксів; 2) окомірно-стереоскопічний; 3) за довжинами падаючих тіней; 4) за величиною зміщення вершини об’єкта відносно його основи.

Ці способи вимірювання використовують геометричні особливості зображення, отриманого шляхом центрального проектування. Для знімків, що мають іншу геометрію, використовують інші способи. Проте деякі принципи, такі як зв’язок тіні об’єкта з його висотою, можуть застосовуватись і для вимірювань на перспективних зображеннях.

*1. Вимірювання висот за різницями поздовжніх паралаксів.* Припустимо, що здійснюють знімання місцевості з двох різних точок $S_1$ і $S_2$, об’єкти місцевості при цьому відображаються на негативах (на плівці)

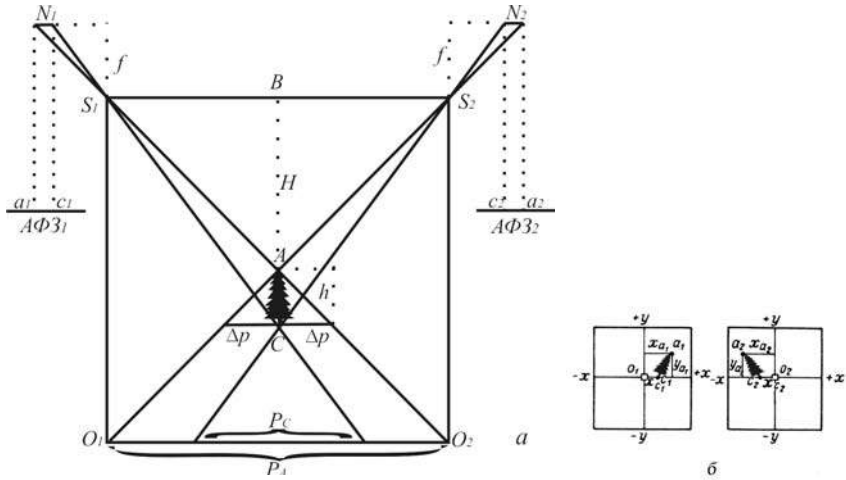



Рис. 4.20. Визначення поздовжнього паралаксу:
а) на місцевості, б) на стереопарах аерофотознімків.

$N_1$ і $N_2$. З негативів отримуємо зображення на аерофотознімках АФЗ$_1$ і АФЗ$_2$ (рис. 4.20). Відстань між точками знімання називають *базисом фотографування*. $S_1$, $S_2$ – центри проектування (об'єктиви). Розглядаємо ідеальний випадок, коли знімки і базис не мають похилів.

Нехай точки *A* і *C* мають перевищення одна відносно одної *h*. На знімках точки *A* і *C* відобразяться як $a_1$ і $c_1$, $a_2$ і $c_2$. Положення кожної точки на знімках визначають у координатах, осі яких – це координатні лінії знімків. Ординати точок будуть рівні, різняться лише абсциси. Різницю абсцис двох зображень однієї і тієї ж точки на різних знімках називають *поздовжнім паралаксом*.

Для точки *A* паралакс дорівнює $P_A = O_1a_1 - O_2a_2 = xa_1 - xa_2$.

Для *C* паралакс дорівнює $P_c = xc_1 - xc_2$.

Точки *A* і *C* розміщені на різній висоті, тому їхні абсциси не будуть рівні між собою. Виникає так звана *різниця паралаксів Δp*:

$$\Delta p = p_A - p_C \text{ (див. рис. 4.20. } a\text{)}.$$

На основі різниці паралаксів виводимо формулу для обчислення висот об'єктів (також і глибин):

$$h = \frac{H}{b}\Delta p,$$

де *h* – висота або глибина об'єкта, *H* – висота фотографування, *Δp* – різниця паралаксів, *b* – базис фотографування в масштабі аерофотознімка, $b = \frac{f}{H}B$, де *B* – базис фотографування на місцевості.

Висоту фотографування *H* в аеротопографічній практиці вираховують від єдиної початкової площини, тому перевищення рельєфу, які трапляються на місцевості, повинна дорівнювати нулю. Щодо базису фотографування, то при форматі аерофотознімків 18×18 см і поздовжньому перекритті 60 % приймають за постійну величину *b* = 65 мм.

Точність вимірювання висот об'єктів даним способом становить ±0,5 м. Помилка тим менша, чим більша висота фотографування або чим менша висота об'єкта. Вимірювання висот окремих об'єктів за різницями паралаксів обмежено тим, що вершина й основа об'єкта повинні бути поряд. Якщо збільшити відстань між ними, збільшується похибка вимірювань, тобто даний спосіб більш ефективний для вимірювань малих об'єктів.

2. *Окомірно-стереоскопічний спосіб визначення висот.* Ґрунтується на візуальній оцінці висот під стереоскопом *hc* з подальшим обчисленням їхніх реальних висот *h* за формулою:

$$h = h_c m_B \frac{1}{v},$$

де $v$ – збільшення лінз стереоскопа, $h_c$ – візуальна оцінка висоти під стереоскопом, $m_B$ – знаменник вертикального масштабу стереомоделі, вертикальне перевищення стереомоделі. Вертикальний масштаб стереомоделі обчислюють за формулою

$\frac{1}{m_Г}$ – горизонтальний масштаб знімка, $\mu$ – вертикальне перевищення стереомоделі.

$$\mu = \frac{S_o b}{b_r f} = \frac{S_o}{f},$$

де $S_o$ – відстань найкращого зору = 250 мм (дорівнює відстані від аерофотоапарата для лінз походу головного променя = фокусній відстані лінз = 250 мм), $f$ – фокусна відстань аерофотоапарата, $b_r$ – очний базис = 65 мм, $b$ – базис знімання в масштабі знімка = 65 мм, $\frac{b}{b_r} = 1$.

Наприклад, знайдемо висоту об’єкта за такими параметрами: нехай фокусна відстань об’єктива 100 мм, $m = \frac{S_o}{b} = \frac{250}{100} = 2,5$ мм. Припустимо $m_Г$ = 17 000, тоді $m_В = \frac{m_G}{m} = \frac{17000}{0,25} = 68000$. Підставимо отримані значення у формулу висоти, вважаючи, що $v$ = 5, $h_c$ = 0,2 мм:

$$h = h_c m_B \frac{1}{v} = \frac{0,2 \cdot 68000}{5} = 2720 мм = 27,2 м.$$

Отже, висота об’єкта на місцевості, обчислена окомірно-стереоскопічним способом, дорівнює 27,2 м.

*3. Визначення висот за довжинами тіней.* Довжини тіней визначають дуже ретельно, оскільки об’єкти, що їх кидають, є малими, і тіні виглядають короткими. Обчислення виконують за формулою:

$$h = \frac{lm}{n} = \frac{L}{n},$$

де $l$ – довжина тіні на знімку, $L$ – довжина тіні на місцевості, $m$ – знаменник масштабу знімка, $n$ – відносна довжина тіні, яку отримуємо як

співвідношення висоти об'єкта до довжини тіні; залежить від географічної широти, дати і часу знімання і дорівнює котангенсу (*ctg*) кута падіння сонячних променів на горизонтальну поверхню. Величину *n* знаходять з готових таблиць чи графіків, складених В.І. Друрі (1934).

Під час знаходження довжини тіні варто враховувати, що вимірювання проводять у напрямі падіння тіні і що сам об'єкт має перспективне зміщення.

*4. Визначення висот об'єктів за зміщенням їхніх вершин відносно основи* або за паралактичним зміщенням. Цей спосіб потребує знання величини самого зміщення $\delta_h$, відстані від вершини об'єкта до центра аерознімка (точки надиру) *r* і висоти фотографування *H*.

Обчислення виконують за формулою:

$$h = \delta_h \frac{H}{r},$$

де $\delta_h$ – величина зміщення вершини від основи, *r* – відстань від вершини до центра знімка, *H* – висота фотографування.

Помилка вимірювань тут тим менша, чим більша відстань від центра знімка до вершини об'єкта. Чим більший зсув, тим завбачувана помилка висоти менша. Тому під час обчислень цим способом варто вибирати об'єкти на аерофотознімку ближче до його краю, з більшою відстанню від вершини до основи. Висота об'єкта є пропорційною зміщенню зображення його вершини відносно основи.

### 4.5.5. Визначення крутизни схилів на аерофотознімках

Визначення крутизни схилів є одним з аспектів географічних аерокосмічних досліджень. Виконують окомірно-стереоскопічним та інструментальним способом.

Окомірне визначення кутів нахилу схилів потребує достатнього досвіду і натренованості спостерігача, а також урахування видимої деформації стереомоделі. Еталоном слугують схили з відомою крутизною. Деформацію стереомоделі можна ігнорувати, якщо кути нахилу не перевищують 15°. Деформація стереомоделі виникає також через зміщення точки спостереження, що залежить від положення стереоскопа над знімками. Враховуючи сумарний вплив деформації стереомоделі, дійсний кут нахилу схилів обчислюють за формулою:

$$ctg\lambda = \mu ctg\lambda' + a,$$

де $\lambda$ – реальний кут нахилу, $\lambda'$ – видимий кут нахилу, $\mu$ – коефіцієнт вертикального перевищення стереомоделі, $a$ – поправка, зумовлена положенням схилу, який вимірюють. Її знаходять так:

$$a = \frac{d}{f}\cos\beta ,$$

де $d$ – відстань від центра моделі до вершини вимірюваного схилу; $\beta$ – кут, утворений радіусом-вектором, що проведений з центра моделі на вершину об'єкта, і вектором падіння схилу; $d$ і $\cos\beta$ вимірюють безпосередньо на аерофотознімку; $f$ – фокусна відстань аерофотоапарата.

Під час окомірно-стереоскопічного способу послідовно виконують такі операції: спочатку крутизну схилу оцінюють на око відносно горизонтальної площини, якою є площина аерофотознімка – стола, потім визначають на знімках величини $d$ і $\beta$. Якщо $d = 0$ або $\beta = 90°$ і $270°$, коректувальний коефіцієнт $a$ не враховують.

Дійсний кут нахилу схилів визначають також за готовою номограмою (рис. 4.21).

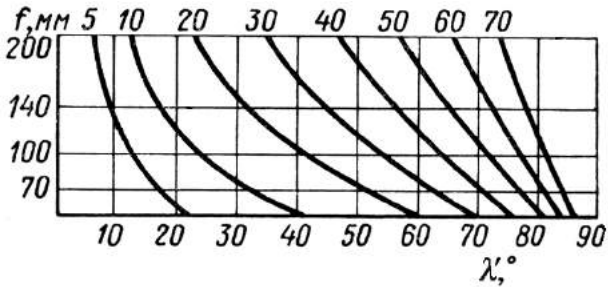



Рис. 4.21. Номограма для визначення дійсної крутизни схилів за видимою зі встановленням стереоефекту на аерофотознімках.

*Інструментальні способи* визначення крутизни схилів ґрунтуються на прямих вимірюваннях кутів на спеціально сконструйованих стереовимірювальних приладах. Наприклад, на геологічному стереометрі або стереокутомірі. Поширеним є спосіб вимірювання кутів нахилу місцевості за допомогою вимірювальних палеток. Вони являють собою ексцентричні кола, викреслені на прозорому папері – кальці. Кальку накладають на два знімка-стереопари, і під час розглядання в стереоскоп сприймають як перевернутий конус (рис. 4.22).

Кругові палетки накладають на два знімка, які становлять стереопару, і при розгляданні в стереоскоп сприймаються як перевернутий конус. Взаємним розворотом палеток можна зменшити або збільшити висоту (глибину) конуса і тим самим зменшити кут нахилу його твірної. Сполучаючи конус по твірній зі схилом, можна визначити кут нахилу схилу:

$$tg\lambda = \frac{h}{d},$$

де $h$ – висота форми рельєфу від підніжжя до вершини, величину якої в площині знімка беруть на око, $d$ – радіус зовнішнього кола палетки. За значенням $tg$ з таблиць чи функцій калькулятора знаходимо дійсний кут нахилу $\lambda$.

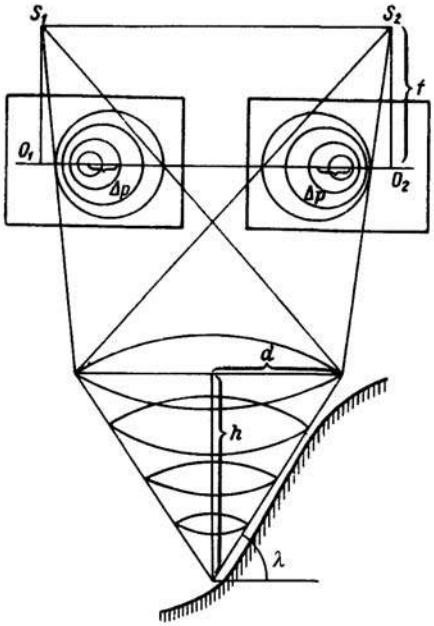



Рис. 4.22. Кругові палетки для визначення кутів нахилу місцевості зі встановленням стереоефекту на аерофотознімках.

Середня квадратична помилка визначення кута нахилу схилу окомірно-стереоскопічним способом становить ±3–4°, за вимірювальними приладами – ±2,5–4°, за допомогою палеток – ±2–3°. Отже, точність вимірювань всіма способами приблизно однакова.

## 4.6. Прилади для роботи зі знімками

### *4.6.1. Прилади для перетворення знімків*

*Фотозбільшувачі* є найдавнішими та були найпоширенішими приладами для проекційного збільшення зображень з плівок на фотопапір. Прості аматорські збільшувачі мають майже всі ті конструктивні елементи, які влас-

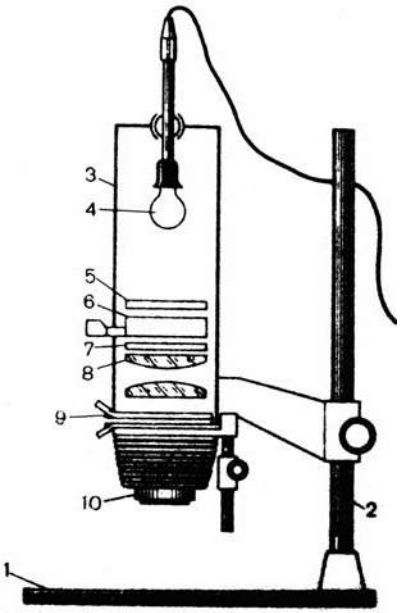



Рис. 4.23. Схема будови фотозбільшувача:
*1* – проекційний стіл; *2* – штанга; *3* – кожух освітлювача; *4* – лампа; *5* – теплофільтр; *6* – рамка для коректувальних світлофільтрів; *7* – матове скло; *8* – конденсор, *9* – рамка для негативу; *10* – об'єктив.

тиві сучасним фотоскопам, проекторам, фототрансформаторам чи інверсорам (рис. 4.23).

Кожен фотозбільшувач складається з проектора і проекційного стола. Проектор є складнішою частиною і сам складається з джерела світла з рефлектором у світлонепроникній, але не герметичній камері, матового скла для розсіювання променів, рамки для світлофільтрів, рамки для негатива, лінзового конденсора для паралелізації світлових променів, об'єктива для фокусування зображення плівки на проекційному столі. Проектор з усіма його складовими частинами закріплюють на штанзі, прилаштованій до стола, по якій може пересуватися вверх і вниз, відповідно збільшуючи чи зменшуючи зображення, що проектується на стіл. Більш складні проектори мають змогу змінювати силу джерела світла, автоматично встановлювати різкість зображення на проекційному столі, поєднувати світлофільтри, і, що важливо для трансформації знімків, мають пристрої для встановлення потрібного нахилу рамки з плівкою в будь-якому напрямку, а також змінювати нахил площини проекційного стола. Останні елементи удосконаленої конструкції властиві вже спеціальним великим фототрансформаторам.

*Фототрансформатори* використовують спеціальні аерофотогеодезичні підприємства, які виконують аерофотознімання для обслуговування різних господарських потреб, чи для оновлення топографічних карт. За своєю конструктивною будовою – це фотозбільшувачі складної конструкції для роботи з широкоформатни-

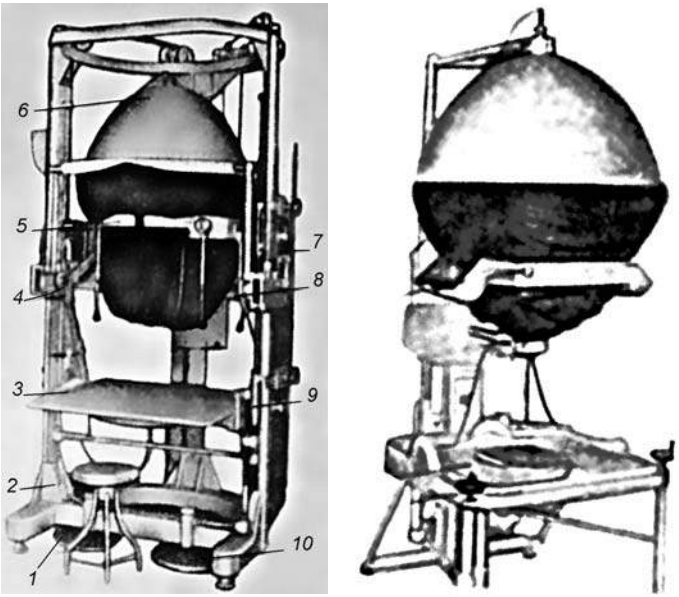



Рис. 4.24 Загальний вигляд фототрансформаторів моделей ФТБ (зліва) та ФТМ (справа). Позначення для ФТБ – 1 – дисковий ніжний привід для зміни масштабу зображення; 2 – станина; 3 – екран (проекційний стіл); 4 – масштабний інверсор; 5 – касета для плівки; 6 – освітлювач; 7 – перспективний інверсор; 8 – супорт[12] об'єктива; 9 – вісь нахилу екрана; 10 – диск перспективного інверсора[13] [44].

ми плівками знімальних АФА. На фототрансформаторах можна трансформувати планові і перспективні негативи (рис. 4.24).

Наявно кілька типових великих (до трьох метрів висоти) і малих моделей трансформаторів. Об'єктив трансформатора може рухатися тільки вздовж візирної осі, яка паралельна до вертикалі масивної станини. Каретка з плівкою (розміром до 30×30 см) має змогу бути нахиленою під різними кутами до горизонталі. Проекційний стіл також може бути нахиленим стосовно горизонталі на кути до 45°. Управління нахилами каретки плівки та стола здійснюється дисками для ніг та ручними гвинтами. Дисками для ніг

[12] Супорт – пристрій для закріплення.

[13] Інверсор – перетворювач, перевстановлювач. Від "інверсія" переміна наявного порядку характеристик.

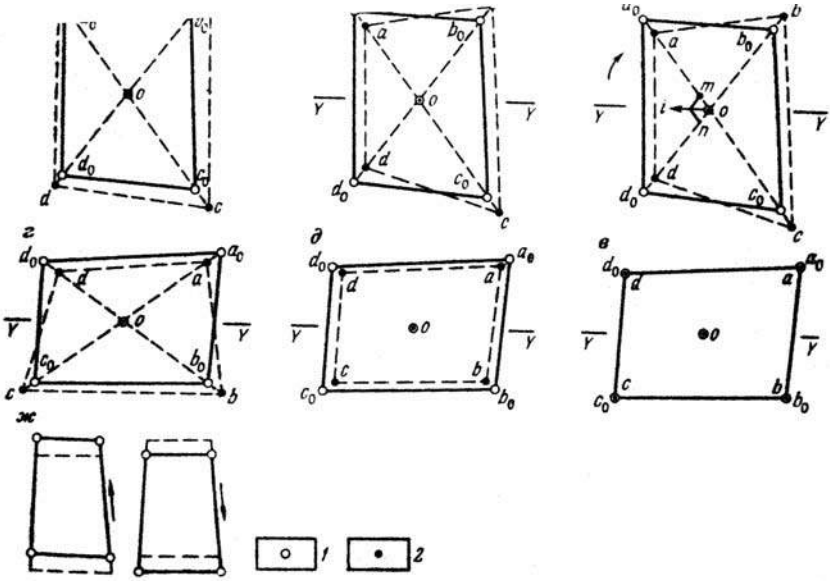



Рис. 4.25. Послідовність фототрансформації на ФТБ.
1 – трансформаційні пункти на трансформаційному планшеті;
2 – трансфомаційні пункти на аерофотонегативі, призначеному для трансформування [44].

виконують управління розміром (масштабом) зображення, ручними лівим і правим штурвалами можна змінити кут нахилу стола в поздовжньому та поперечному напрямках, а ще іншою парою ручних гвинтів – змінити кути нахилу каретки з негативом.

Методики трансформування знімків нескладні, але потребують від оператора ретельності та наполегливості.

Значно поширеною є трансформація знімків за опорними пунктами (рис. 4.25). Для цього завдають (визначають) опорні пункти на плановій основі в правильній проекції і ті ж самі пункти на негативі, що потребує трансформації. Опорні пункти на негативах проколюють, щоб вони світилися на екрані, а на карті, плані чи спеціально виготовленому планшеті – зачорнюють, щоб були добре видні в слабкому освітленні. Наступні операції полягають в підборі таких нахилів каретки і проекційного стола, щоб усі мітки на негативі і на карті (плані, планшеті) сумістити. За цієї умови зображення негатива буде в одних місцях стиснене, в інших

– розширене, а загалом – приведене до розподілу, передбаченого використаною проекцією. Після досягнення збігу всіх (п'яти) пунктів виконують експонування на фотопапір, а після його фотохімічного оброблення отримують виправлений знімок.

Подібну будову мають *універсальні топографічні проектори (УТП)*, основне призначення яких – зміна масштабів карт та інших графічних зображень, їхнє фотокопіювання. Проте цей апарат з успіхом може виконати роль фототрансформатора, бо в нього також є рухомий стіл, та касета для плівки. Процес трансформування аналогічний зазначеному для моделей ФТБ.

***Стереофотограмметричні прилади***

Стереоприлади призначені для роботи зі стереопарами знімків – переважно для їхнього дешифрування та вимірювання перевищень у межах стереозображення. Окремі конструкції стереоприладів мають також функції перетворення, а саме – перетворення стереомоделей рельєфу в топографічний план чи гіпсометричну карту. Таким є, зокрема, стереопроектор СП-3 – конструкції Г.В. Романовського (рис. 4.26).

Це складний і високоточний прилад, який потребує спеціаліста з достатньо стійкими навиками роботи зі стереофотограмметричними приладами. За його допомогою можна викреслювати ізолінії топокарт, виконувати морфометричні роботи для форм та елементів рельєфу.

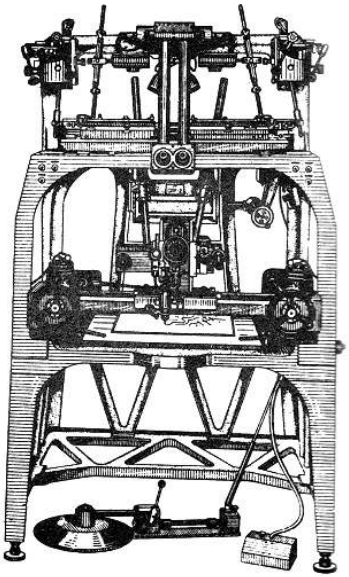


Рис. 4.26. Стереопроектор Романовського СПР-3 [14].

Для оброблення багатозональних знімків застосовують спеціальні проектори, що дають змогу оптичним способом проектувати кілька зображень (два, три, або чотири), пропущені через кольорові фільтри і спроектовані на один екран. Результатом такого поєднання може бути зображення в синтезованих натуральних або умовних кольорах. Його використовують для візуаль-

ного дешифрування з екрана, або фіксування фотокамерою на кольорову фотоплівку.

*Мультиспектральні проектори* служать для створення нових зображень на підставі синхронних кадрів багатозонального знімання. Найвідомішим серед приладів такого ряду є багатозональний синтезувальний проектор МСП-4 (абревіатура з російської – многозональный синтезирующий проектор). Він був створений для синтезу кольорових зображень на підставі чорно-білих негативних або позитивних багатозональних знімків, на яких різниці спектральних яскравостей наземних об'єктів можуть бути перетворені в найсприятливіші для дешифрування та інтерпретації кольорові гами і контрасти. Проектор складний за конструкцією, але порівняно простий в користуванні.

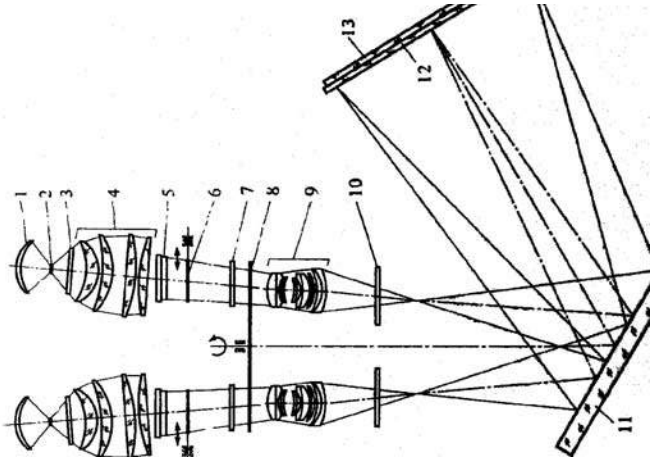
МСП-4 складається з власне проектора та джерела стабільного живлення. Проектор має чотири окремих канали проектування вихідних зображень: каретки для закладання негативів, джерела світла, турелі[14] для світлофільтрів, проекційних об'єктиви, але одне відхиляюче дзеркало та проекційний екран, на який проектуються зображення кожного з каналів. У контакті з екраном, безпосередньо перед ним, закріплена лінза Френеля для кращого просвічування екрану.

Вихідні негативи з кадрами формату 55×81 мм зображаються на екрані з п'ятиразовим збільшенням. Формат зображення на екрані – 350×455 мм. Джерело світла – галогенні лампи, що рівномірно просвітлюють негативи. Складна оптична система забезпечує точне підведення зображення до проекційного екрану з можливістю коректувати світлофільтрами колір світла, його ослаблення, підсилення, переривання (рис. 4.27).

У каретках для встановлення плівок може бути закріплено тільки чотири з шести наявних після знімання камерою МКФ-6. Таке обмеження є зумисним, бо і з чотирма плівками на апараті можна отримати тисячі варіантів синтезованих знімків. Вибір плівок зон для синтезування робить той, хто ставить завдання для синтезування. Плівки в каретках встановлюють за наявними пристосуваннями для закріплення, але пізніше поправляють їх

---

[14] Турель – пристрій для обертання, в цьому випадку – касети із світлофільтрами.



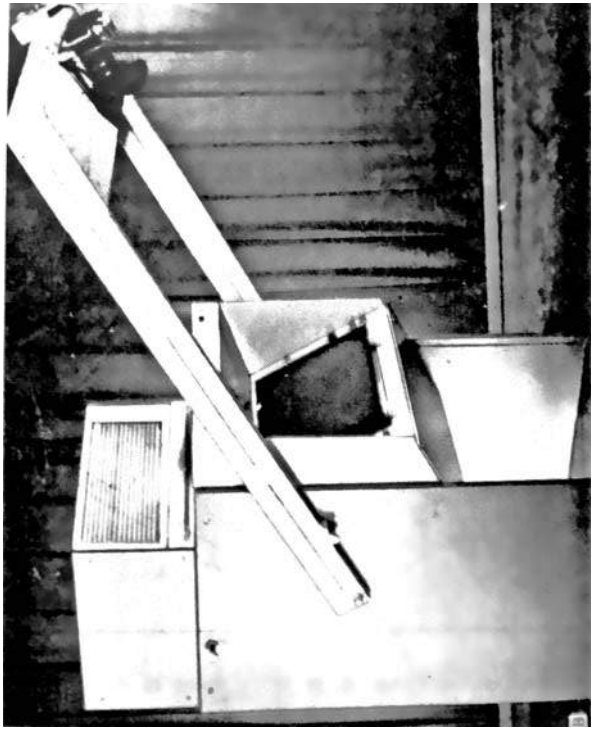



Рис. 4.27. Зліва – багатозональний синтезуючий проектор МСП-4 в позиції готовності до реєстрування зображення екрана. На рамі проектора – закріплена фотокамера "Пентакон-сикс" для реєстрації зображення на екрані. Справа – оптична схема двох каналів МСП-4. Умовні позначення:
1 – увігнуте дзеркало, 2 – галогенна проекційна лампа, 3 – теплофільтр, 4 – лінзи конденсора, 5 – тримач негатива, 6 – замок об'єктива, 7 – кольоровий світлофільтр, 8 – секторний замок, 9 – проекційний негатив, 10 – нейтральний світлофільтр, 11 – відхиляюче дзеркало, 12 – екран, 13 – лінза Френеля.

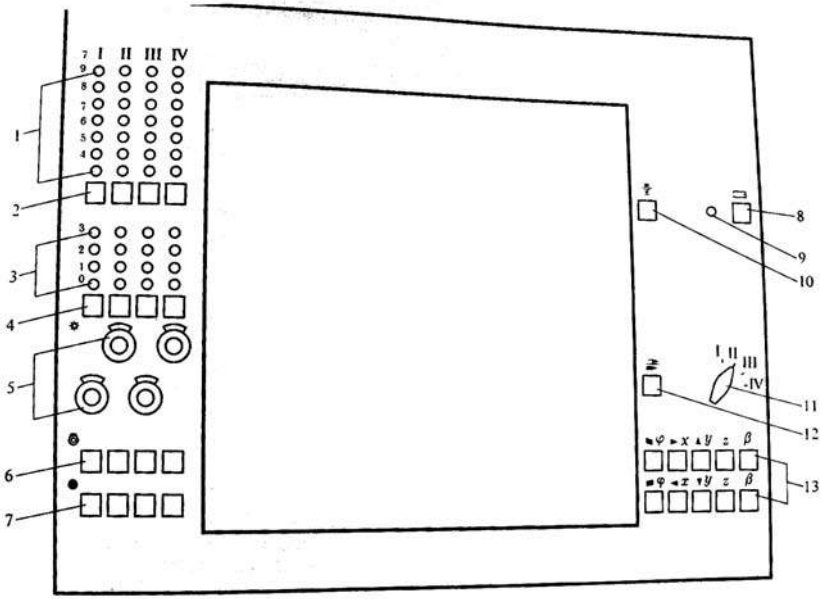



Рис. 4.28. Пульт управління МСП – 4.
Умовні позначення: 1 – сигнальні лампочки кольорових світлофільтрів, 2 – клавіші переміни кольорових світлофільтрів, 3 – сигнальні лампочки нейтральних світлофільтрів, 4 – клавіші зміни нейтральних світлофільтрів, 5 – потенціометр регулювання освітленості, 6 – клавіші галогенних ламп, 7 – клавіші механічних замків об’єктивів, 8 – клавіша експонування реєстраційної касети, 9 – сигнальна лампочка контролю експонування, 10 – клавіша зняття блокування касети, 11 – перемикач каналів для юстування зображення, 12 – перемикач встановлення швидкості юстувальних переміщень, 13 – клавіші юстування та суміщення зображень.

позицію стосовно проекційного екрана за допомогою кнопок пульта, що управляють спеціальними поворотними та зсувними гвинтами каретки (рис. 4.28).

Процедура подальшої роботи така: проектують зображення першої плівки на екран, встановлюючи його паралельно до країв екрана. Ввівши якийсь з кольорових фільтрів, це зображення роблять монохромним. Наступний етап – введення зображення другої плівки.

Зображення з другого кадру проектують на перший так, щоб координатні хрестики на обох зображеннях збіглися. Цю процеду-

ру виконують за допомогою кнопок пульта управління зміщенням вліво чи вправо та поворотом кадрів навколо свого центра, але повинна бути виконана дуже ретельно.

За допомогою введення іншого фільтра забарвлюють і друге зображення. З такою ж послідовністю виводять на екран зображення з третьої та четвертої плівки, особливо ретельно суміщуючи мітки-хрестики кожного негативного зображення з рештою. Після цих операцій на екрані вже створиться зображення в синтезованих кольорах. Якщо такий варіант синтезу чимось не задовольняє дешифрувальника, то використовують інші способи зміни варіантів синтезу. Його можна змінювати управлінням світлового потоку в кожному з каналів через:

- зміну сили джерел світла;
- введення світлофільтрів різних кольорів з різною оптичною щільністю;
- введення нейтральних світлофільтрів;
- перекриттям світлового потоку (синтез в решти не перекритих каналах);
- заміною вихідних негативів негативами з інших не використаних каналів багатозонального знімання.
- Спеціалістами з досвідом роботи на МСП-4 розроблено багато алгоритмів отримання оптимальних варіантів синтезованого зображення для дешифрування різної тематики. Інститут космічних досліджень у Москві спільно з географічним факультетом Московського університету та Інститутом фізики Землі Академії наук Німецької демократичної республіки видано спеціальний навчальний атлас "Дешифрування багатозональних космічних фотознімків" (російською мовою) та аналогічний атлас для телевізійних та сканерних знімків, за якими можна навчатися варіантам синтезу кольорів та дешифруванню синтезованих кольорових зображень.
- Якщо оператором МСП-4 досягнуто бажаного варіанту синтезу, то слід записати всі установки проектора і продовжити візуальне опрацювання (дешифрування) зображення. У разі потреби збереження картинки зі сформованим варіантом синтезу екран фотографують з фотоапарата, зарядженого кольоровою плівкою, або з цифрового фотоапарата.

Фотоапарати повинні бути закріплені на штанзі МСП-4, що забезпечує перпендикулярність візирної осі апарата до площини проекційного екрана та її спрямування в центр екранного зображення. Це служить для отримання фотокопії з найменшими геометричними спотвореннями.

### *4.6.2. Прилади для інтерпретації знімків*

Інтерпретацію аеро- і космознімків та інших матеріалів ДЗЗ виконують, зазвичай, люди за допомогою свого зорового аналізатора, на підставі спеціальних теоретичних знань та здобутого практичного досвіду. Однак, враховуючи обмежені можливості людського зору та скриті від нього можливості матеріалів ДЗЗ, з метою успішного і "комфортного" виконання процесу дешифрування та інтерпретації створено низку пристосувань та приладів.

Одним з найпростіших таких пристосувань є *лупа*. Однак для розглядання знімків варто використовувати лупи з лінзою широкого діаметра: 9–10 см. Такі лупи не мають великої кратності збільшення (переважно дво-триразове), але вони дають змогу розглядати знімки двома очима. Це значно полегшує і поліпшує процес. Ще кращі результати дає застосування спеціальних де-

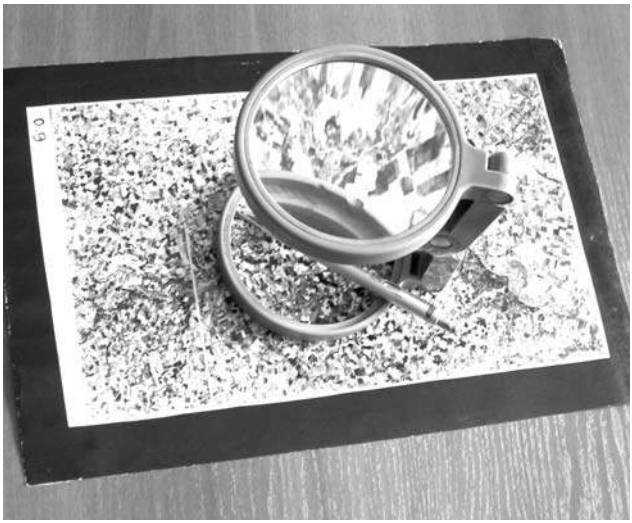


Рис. 4.29. Дешифрувальна лупа зі складаним штативом.

шифрувальних луп, які можуть закріплюватися на штативах, або вже самі мають такий штатив з кільця замість основи штатива. Таку лупу не потрібно тримати руками – її встановлюють безпосередньо на знімок, а в межах кільця основи знімок можна зручно розглядати, або робити на ньому помітки (рис. 4.29).

Успішно використовують також спеціальні бінокулярні лупи з дво- п'ятиразовим збільшенням, які закріплюють на голову. Є лупи із вмонтованим джерелом освітлення та вставкою в периферійну частину основної лінзи додаткового кільця лінзи з вищою кратністю збільшення.

Можна застосовувати також вимірювальні лупи з великим ($10^x$) збільшенням для розглядання дрібних деталей зображення і вимірювання розмірів дрібних об'єктів на знімку. У таких луп у фокальній площині їх окуляра на скляну пластину-основу, що ставиться на знімок, з нижньої її сторони нанесена шкала з ціною поділки 0,1 мм. Це дає змогу здійснити вимірювання з точністю не менше 0, 05 мм (рис. 4.30).

Другим найширше вживаним приладом для вивчення стереопар знімків є *стереоскоп*. Модифікацій стереоскопа випущено багато: стаціонарні, вимірювальні, з більшим чи меншим ком-

Рис. 4.30. Лупи: *1* – з двома варіантами кратності збільшення лінзи та підсвіткою; *2* – вимірювальна лупа зі шкалою 0,1 мм.

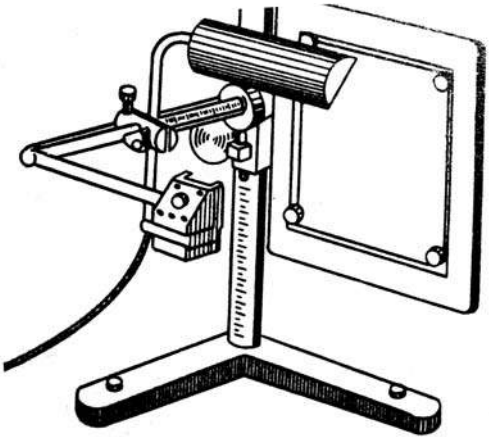


Рис. 4.31. Настільний проектор (камера "Клара") з освітлювальним пристроєм, екраном для знімка, призмовою головкою, шкалами збільшення зображення.

плектом вставних лінз: польові, портативні польові, кишенькові. Головне призначення стереоскопа – створювати змогу отримання стереоефекту під час розглядання стереопари знімків[15]. Під час стереоскопічного ефекту оператор виразно бачить рельєф території, розглядає його "ніби з літака, чи висоти пташиного польоту". Це важлива перевага для споглядання зображень, бо появляється можливість тривимірного аналізу території: можна розрізнити плоскі поверхні на різних висотах, схилові поверхні, визначити крутість схилів, проаналізувати ерозійні врізи з їх параметрами, розрізнити різновисотні об'єкти в містах.

Серед моделей стереоскопів значно поширені дзеркальні та призмові (рис. 4.31).

У сімействі дзеркально-лінзових стереоскопів найзручнішими для візуального дешифрування визнані моделі зі змінним збільшенням, які випускає фірма "Карл Цейс" у Німеччині. Цей прилад дає змогу розглядати стереомодель через насадку з окулярами з чотирикратним збільшенням. При цьому трохи зменшується поле зору, але зростає можливість розглядання деталей зображення. У комплект стереоскопа додається також паралаксометр, за допомогою якого можна вимірювати поздовжні паралакси з

[15] Стереоскопічні пари отримують під час маршрутних аерофотознімань, а також знімань з космосу у випадку перекриття знімками території приблизно на 60%. Така умова задовільняється супутниками, які ведуть знімання з прямих полярних або нахилених сонячносинхронних орбіт.

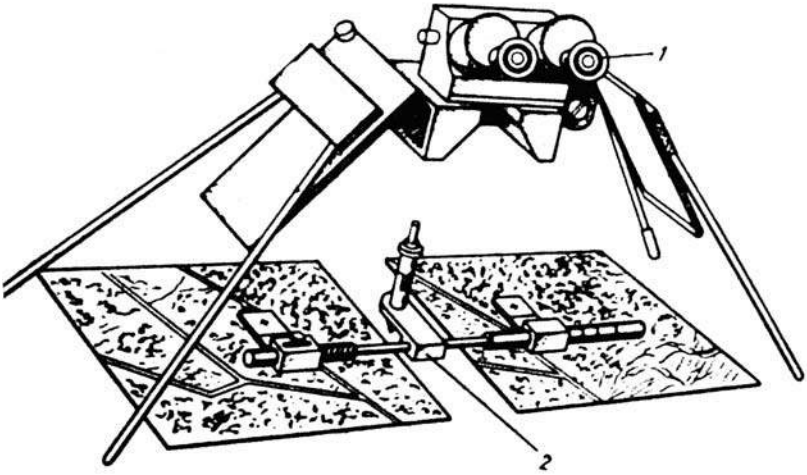



Рис. 4.32. Стереоскоп фірми Карл Цейс.
*1* – бінокуляр, 2 – паралаксометр.

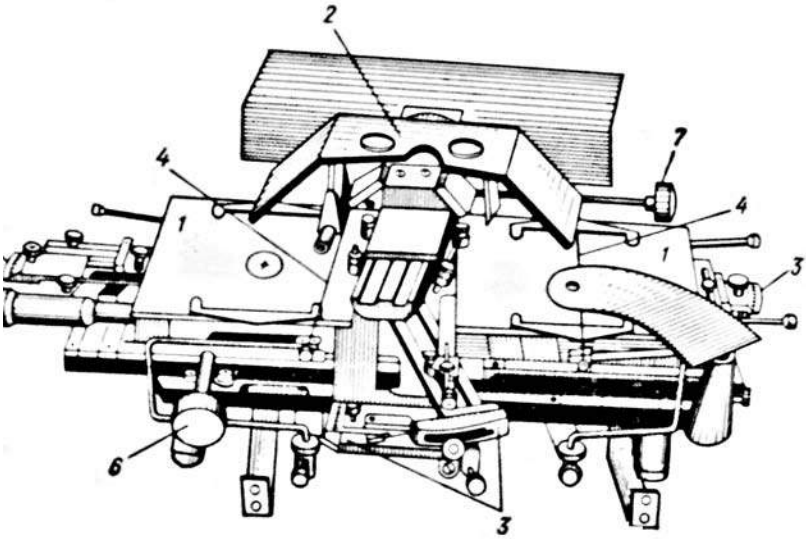



Рис. 4.33. Топографічний стереометр СТД-2. Умовні позначення:
1 – каретки для знімків, 2 – бінокуляр стереоскопа, 3 – корекційні механізми і їхні шкали, 4 – вимірювальні марки; 5 – гвинт поздовжніх паралаксів, 6 і 7 – штурвали.

точністю 0,05 мм і виконувати промірні роботи на стереомоделі, визначати висоти об'єктів місцевості.

Модифікацією комплекту стереоскоп – паралаксометр є *стереопантометр* також фірми "Карл Цейс". Він монтується на спеціальному столі зі скляним верхом (стільницею) та з підсвіткою (як у світлопульта). Передбачено, що використовуватимуть знімки на прозорій основі (плівках) До паралаксометра прикріплений пантограф. Результати дешифрування на стереомоделі через пантограф можна (перенести) викреслити на папері в потрібному масштабі (збільшення плавне, до 15 разового) (рис. 4.32).

Основним приладом для виконання стереометричних робіт є стереометр Дробишева СТД-2. Він дає змогу не тільки виконувати усі роботи, властиві для стереометрів, а й за елементами взаємного орієнтування для кожної стереопари за допомогою пунктів, що мають геодезичні параметри, автоматично вводити поправки у виміряні різниці поздовжніх паралаксів (рис. 4.33).

Часте застосування в дешифруванні мають *фотометри*, які використовують для вимірювання щільності фототонів з подальшою можливістю їхньої класифікації. Завдання вимірювання фототонів часто є дуже суттєвим для точності дешифрування зображення (рис. 4.34).

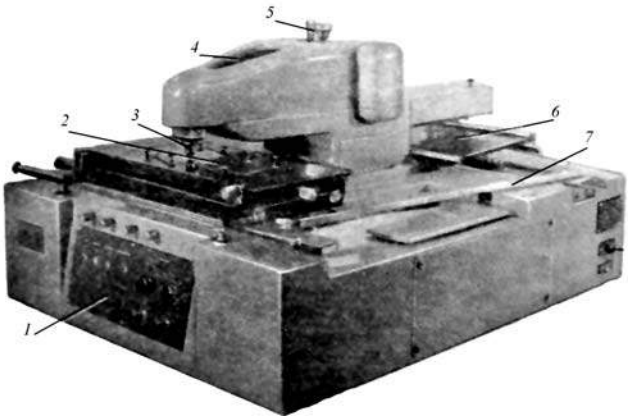



Рис. 4.34. Мікрофотометр ИФО-51. Умовні позначення:
1 – пульт управління, 2 – предметний стіл, 3 – об'єктив, 4 – вікно для спостереження зображення, 5 – ручки для управління для розміром щілини і порівняння, 6 – реєстраційний пристрій, 7 – плече зміни масштабу знімка.

Принцип дії ґрунтується на порівнянні виміряних фототонів з тонами еталонної денситометричної шкали.

Більш складним типом стереоприладів є *інтерпретоскоп*. Це, по суті, великий стаціонарний стереоскоп, що забезпечує змогу одночасного спостереження та інтерпретації стереопари двома дешифрувальниками (рис. 4.35.) Інтерпретоскоп фірми "Карл Цейс" є комбінованим стереоприладом, що має широкі можливості опрацювання різних матеріалів ДДЗ, але передусім – стереопар знімків. Спостереження можливі за матеріалами різних масштабів (у межах їхнього співвідношення 1:7,5) у відбитому чи проникаючому світлі, з можливістю збільшення від двох до шести разів і від п'яти до 15 разів. У верхній частині приладу вмонтована оптика, а нижня його частина служить столом, у який вмонтовано матове скло (18). Матеріали для інтерпретації закріплюють пластинами (19). Фотофільм можна перемотувати з однієї бобіни на другу (16).

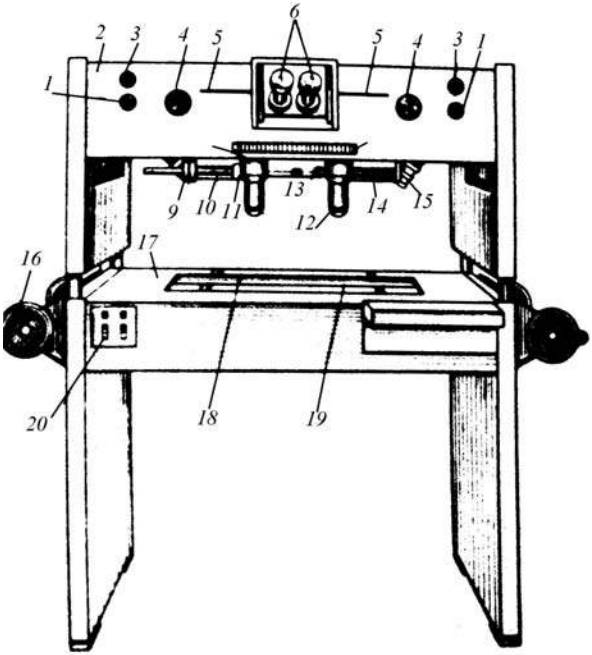



Рис. 4.35. Схема інтерпретоскопа фірми "Карл Цейс" (пояснення в тексті) [14].

Під час роботи з непрозорими матеріалами вмикають проекційні лампи (5). Оптична частина приладу складається з нерухомої окулярної частини (6) і двох об'єктивів. Необхідне збільшення встановлюють ручками 4 за шкалою 5.

Універсальним приладом для дешифрування та інтерпретації зображень вважають стереопроектор Романовського (див. рис. 4.26). Він може виконувати функції стереоскопа, стереометра, стереокомпаратора та стереопантографа.

Для дешифрування зручно використовувати також багатозональний спектральний проектор МСП-4, опис якого міститься у попередньому пункті.

До приладів для дешифрування та опрацювання знімків належать також стереокомпаратори, стереоскопи-пантографи, картофлекси, стереоанаграфи та ін.

Нове покоління приладів для опрацювання дистанційної інформації комплектується сучасними комп'ютерами і периферій-

Рис. 4.36. Цифровий фотограмметричний комплекс "Дельта" державного науково-виробничого підприємства "ГеоСистема". (Виробник Україна, м. Вінниця. Поставляє свою продукцію в розвинені країни світу).

ними пристроями (високоточними сканерами, фотограмметричними установками), створюючи спеціалізовані робочі комплекси операторів для опрацювання дистанційних матеріалів (рис. 4.36).

Залежно від потреб комплекси можуть компонуватися спеціалізовано для виконання реальних робіт, а саме:

- Станція сканування забезпечує високоточними цифровими знімками в стандартних графічних форматах придатних для використання в різних системах фотограмметричного опрацювання. Може використовуватися як навчальний комплекс Має високу роздільну здатність – розмір піксела – 7мкм. (3 600 крапок на дюйм) та високу для такої детальності швидкість сканування (12–20 хвилин для знімків розміром до 300×300 мм);
- Станція стереоскладання та ортофототрансформування: може використовувати знімки, отримані на різних сканерах (виробництва інших фірм) ;
- Фотограмметричні комплекси: для професійної роботи (“Дельта” і “Дельта-2”). Комплекс складається з фотограмметричного сканера з розміром піксела14 мкм, робоче місце стереоцифрування з потужним комп’ютером.

## 4.7. Основні програми з інтерпретації дистанційної інформації

Комп’ютерні пакети з опрацювання дистанційних даних поділяємо на три види: 1) програми з коректування якості фотознімків, до яких належать програми-редактори растрової графіки Adobe Photoshop, Corel Photopaint, Artweaver, Photo Editor, Photo Filter, Photoscape, Picasa та ін.; 2) растрові геоінформаційні системи (ГІС), що виконують обробку власне космічних та цифрових аерозображень (ERDAS Imagine, ENVI, Idrisi for Windows); 3) векторні ГІС, в яких домінує побудова та аналіз векторних даних і які меншою мірою виконують опрацювання растрової інформації. Це, зокрема, ArcGIS, ArcView, MapInfo ArcInfo та ін. Програмні пакети ArcGIS та ArcView отримали додатковий модуль з оброблення дистанційних матеріалів Image Analysis™.

### *4.7.1. Введення та подання зображень на екрані монітора*

Для опрацювання у комп'ютерних програмах космічні та аерофотознімки повинні бути в цифровому вигляді. Їх отримують від космічних агентств на цифровому носії, плівці чи фотопапері. Провайдери аерокосмічної інформації надають кольорові знімки у кількох спектральних каналах, у яких відбувається знімання. Це полегшує їхню автоматизовану інтерпретацію. Знімки на негативі чи фотопапері вводять до комп'ютера шляхом сканування і дістають зображення на екрані монітора в одному монохромному або трьох кольорових каналах.

Поширеним способом отримання якісних знімків у різних масштабах є їхнє завантаження зі спеціальних веб-сайтів мережі Інтернет. З 2005 р. почала діяти інтерактивна програма перегляду космознімків Google Earth, яку інсталюють з сайту *www.earth.google* на персональний комп'ютер. Тут в онлайновому режимі відображається вся земна куля, і користувач може збільшити окремі космозображення до масштабу 1:1 000. Під час запису в пам'ять комп'ютера космознімки утворюють один шар, що є достатнім для огляду, а для автоматизованої обробки цього замало. Проте існують веб-сайти, де космічна інформація подана у різних спектральних діапазонах (*http://glcf.umiacs.umd.edu*). Завантажують знімки по одному каналу, а пізніше проводять їхнє синтезування, отримуючи кольорове спектрозональне зображення, придатне для автоматизованої обробки.

Екранне зображення подане у вигляді *растрової графіки*. Растр – це зображення, що складається з окремих точок, які називають пікселами (*pixel* – з англ. Picture element, елемент зображення). Кожен піксель має свій колір, зі системи кольорів пікселів складене зображення. Тобто у збільшеному вигляді цифровий кольоровий знімок можна уявити собі як таблицю з квадратними комірками, кожна з яких має своє фіксоване положення і колір. Колір складений з трьох байтів інформації, перший з яких відповідає за частку червоного (Red), другий – за частку зеленого (Green) і третій – синього (Blue) кольорів. Величина числа, розміщеного в одному байті, може змінюватись від 0 до 255. Задаючи межі частки кожного кольору, отримують сумарний колір пікселя. Так утворюється цифрове растрове зображення у палітрі RGB-коль-

орів. Кольори режиму RGB сформовані природнім світлом, яке випромінюють об'єкти.

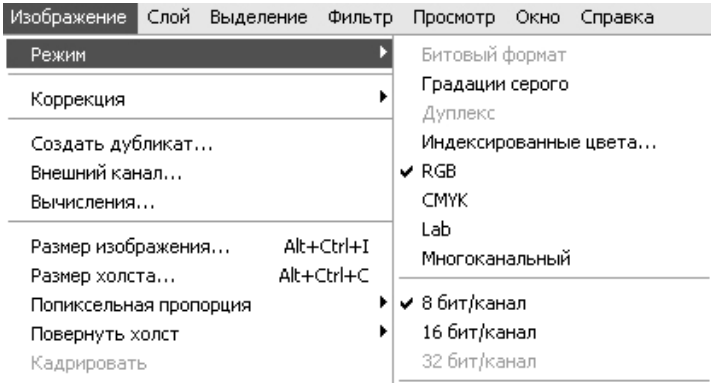
У палітрі RGB-кольорів червоний, зелений і синій кольори є первинними. Коли всі три компоненти приймають максимальне значення, виходить яскравий білий колір. Однакові нульові значення утворюють абсолютно чорний колір (точніше, відсутність світла), а однакові ненульові значення відповідають шкалі сірого кольору. Поєднання компонент, де їх значення не рівні, утворюють відповідний колірний тон. Наприклад, щоб утворити ідеально жовтий колір у палітрі RGB, треба виставити червоного 255, зеленого 242 і синього нуль одиниць. Попарне змішування первинних кольорів утворює вторинні кольори: блакитний (Cyan), пурпуровий (Magenta) і жовтий (Yellow). У наведеному прикладі жовтий колір утвориться з нуль частки блакитного, нуль пурпурового і 100 власне жовтого кольору. Первинні і вторинні кольори належать до базових кольорів.

Проте в програмі не існує моделі CMY-кольору, а є модель CMYK. У назві використовують літеру K – останню літеру в слові B1ak (чорний), щоб уникнути плутанини, оскільки з букви B в англійській мові починається і слово B1ue (синій). Базовий чорний колір ввели тому, що під час змішування кольорів отримували брудно-коричневі, а не ідеально чорні кольори [79].

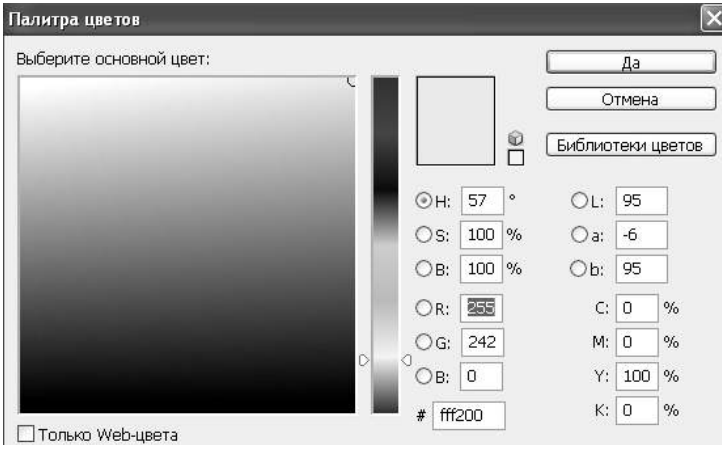
Колірні моделі RGB і CMYK не є ідеальними, вони не повністю передають на моніторі кольорову гаму об'єктів місцевості. Зокрема, модель CMYK не може відтворювати яскраві насичені кольори, а також ряд специфічних кольорів, таких як металевий і золотистий. Під час виведення на друк іноді неможливо передати деякі кольори, які на екрані відображені у RGB. Кольорові моделі залежать також від апаратних установок.

Отже, після сканування фотографічні кольорові аерофото- і космічні зображення виводять на екран монітора у природних RGB-кольорах. Кольори палітри CMYK використовують при виводі на друк, оскільки вони формуються типографськими фарбами. У графічних редакторах, таких як Adobe Photoshop, передбачені й інші моделі кольорів (рис. 4.37).

Якщо як базові кольори використовують чорний і білий, то йдеться про шкалу градацій чорного (або сірого) кольору. Таке зображення, за якого колір пікселів вибирають з двох базових




*а*




*б*

Рис. 4.37. Моделі кольорів і тонів, якими зображені на екрані монітора цифрові зображення:
*а* – вибір режиму загалом; *б* – задання конкретного кольору.

кольорів, називають монохромним. Префікс моно- свідчить про одиничність, і в цьому випадку – про те, монохромне зображення можна видрукувати за допомогою одного кольору, другим базовим кольором часто є колір паперу, на якому буде видруковане зображення. У монохромному зображенні в одному пікселі записано 8 біт інформації про кольори. Оскільки комп’ютер використовує двійкову систему числення, то звівши два у степінь

бітової глибини (вісім), отримуємо 256 відтінків сірого кольору. Це є повний тоновий діапазон.

Аерофото- та космічні знімки на чорно-білій панхроматичній плівці та чорно-білі цифрові чи радарові космознімки на екран монітора виводять у градаціях сірого тону (у кольоровий режим їх перетворити неможливо). Тон у растровій графіці розуміють як ступінь яскравості пікселя. Розрізняють три його складові: тіні (найтемніші тони), середні тони і світло (найсвітліші тони). Основна частина візуальної інформації і важливі деталі на аерокосмічних зображеннях записані у середніх тонах сірого кольору. Окремі ділянки тонового діапазону можуть випадати. Тобто на знімках майже немає об'єктів власне чорного і білого тону. Незважаючи на це, аерофото- і космічні знімки у градаціях сірого кольору мають широкий діапазон середніх тонів. Це означає, що їм властиві глибокі кольори і чіткі деталі зображення. Об'єкти відображаються на таких знімках з досить високою детальністю, а самі зображення навіть передають деяку інформацію, яка не читається на кольорових знімках.

Другою характеристикою космічних та аерофотографічних зображень на екрані монітора є їхня *роздільна здатність*. Розрізняють роздільну здатність сканера, що зчитує зображення на папері, та зісканованого зображення, роздільну здатність монітора, а також цифрової фотографічної камери і сканера, що виконують космічне знімання, та роздільну здатність космічного чи аерофотознімка. Все це різні величини, які впливають на чіткість екранних зображень і можливості їхньої інтерпретації.

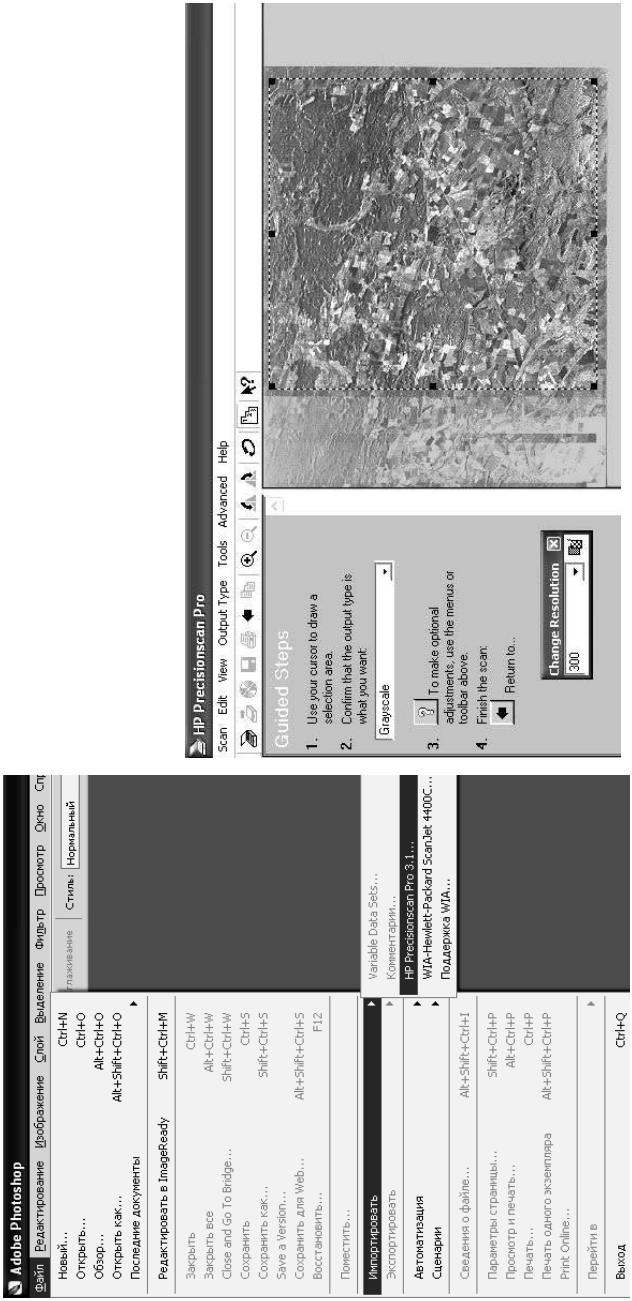
Сканери і цифрові камери – це два види оптичних пристроїв, які здатні "розпізнати" тональність і колір. Сканери і цифрові камери збирають інформацію за червоним, зеленим і синім кольорами, а потім інтерпретують її в пікселі. Як і будь-яка цифрова інформація, пікселі зображаються числами. Для того, щоб розшифрувати ці числа, необхідний комп'ютер, а для того, щоб зробити зображення видимим, – відеокарта і монітор.

Основою будь-якого сканера є сенсор – світлочутливий пристрій у вигляді лінійки або матриці (значно рідше, оскільки дорожче), які використовують зарядовий зв'язок. Число елементів у лінійці на одиницю довжини, а також механізм крокового двигуна сканера (число кроків на дюйм) визначають апаратну

роздільну здатність сканера. Отже, *роздільною здатністю сканера* для зчитування фотографічних (а також штрихових чи текстових) зображень називають його технічну характеристику, яка показує, у скількох місцях на одиницю довжини виконується фіксація (відлік) характеристик зображення, що сканують.

Для отримання чітких зображень, під час сканування фотографічних матеріалів потрібно виставити певну роздільну здатність. Для інтерпретації знімків на екрані монітора достатньо сканувати зображення з роздільною здатністю 300 dpi. Щоб отримати якісне зображення під час виводу його на друк, знімки треба сканувати з роздільною здатністю 600–800 dpi (dpi – dot per inch, з англ. крапки на дюйм. Це величина, що показує кількість крапок, які здатний надрукувати принтер на одному лінійному дюймі паперу, або роздільна здатність принтера).

Сканування виконують у графічному редакторі типу Adobe Photoshop, які забезпечують пряму інтеграцію з більшістю сканерів, точніше, з їхнім програмним забезпеченням. Підменю File\Import (Файл\Імпорт) забезпечує прямий доступ до всіх встановлених у системі сканерів. Програмне забезпечення сканерів у вікні програми може виглядати інакше, але загальні принципи й основні елементи управління у таких програмах аналогічні. Після того, як вибрали в підменю тип сканера, з'явиться відповідне діалогове вікно (рис. 4.38). Починають сканування, вибираючи інструмент "Нове сканування" в крайньому лівому ряді підменю. Програма виконає попереднє сканування, після чого у спадному меню "Comfirm that the output type..." виставляють палітру кольорів і у вікні "Change Resolution" – роздільну здатність сканування. Для завершення сканування натискають кнопку "Return to…". Зіскановане зображення буде перенаправлене з вікна сканера у вікно програми Photoshop. Растрову графіку потрібно зберегти в одному з графічних форматів. Зазначимо, що чим з вищою роздільною здатністю сканують знімки, тим більшим буде розмір файлу растрового зображення, досягаючи десятків і сотень мегабайт. Наприклад, під час сканування фотографії розміром 10×15 см з роздільною здатністю 100 dpi (зображення такої якості підходять хіба що для пересилання по електронній пошті і перегляду на екрані монітора), об'єм зображення перевищить 500 Кбайт. Тому всі формати, в яких зберігають растрову графіку, використовують




*а* *б*

Рис. 4.38. Виконання процесу сканування у програмі Photoshop:
*а* – виклик вікна сканера через відповідне підменю програми,
*б* – діалогове вікно сканера типу Hewlett Packard для запуску процесу сканування.

алгоритми стиснення. Найоптимальнішими форматами, які значно стискають зображення не втрачаючи його якості, є формати .png, .gif та .jpg. Оптимальною роздільною здатністю для сканування зображень з їхнім подальшим видруком після оброблення є 300 dpi.

У *цифровій фотографічній камері* головним (і найдорожчим) елементом є ПЗЗ-матриця (ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком), а роздільною здатністю матриці визначають якість цифрового зображення.

Апаратну *роздільну здатність монітора* визначають за технологією виготовлення його електронно-променевої трубки або рідкокристалічної панелі, що містить осередки для відтворення пікселів растрового зображення. Її визначають за числом пікселів у лінійному дюймі на екрані монітора (ppi – pixel per inch). Ця величина ніколи не міняється, оскільки залежить від конструкції монітора. Стандарт SuperVGA припускає, що на екрані монітора відтворені 800 пікселів по горизонталі і 600 пікселів по вертикалі. На моніторі з розміром діагоналі 14 дюймів це відповідає роздільній здатності 96 ppi. У сучасних моніторах користувач має змогу вибрати один з декількох можливих варіантів роздільної здатності засобами операційної системи, зокрема, значного поширення набув розмір екрана 1024×768 пікселів.

Роздільна здатність монітора ніяк не пов'язана з роздільною здатністю растрового зображення, яке на ньому відтворюється. Якщо чисельні значення цих величин збігаються, зображення буде відтворено на екрані у натуральну величину. Проте якщо роздільна здатність зображення вища, ніж роздільна здатність монітора, розміри зображення на екрані будуть більшим від його дійсних розмірів. Припустимо, що зображенням є квадрат зі стороною 1 дюйм і розрізненням 300 ppi. У разі виведення такого зображення на екран з апаратним розрізненням 72 ppi, розміри квадрата будуть у чотири рази більші. Це відбувається через те, що під час виведення растрового зображення на екран кожному пікселю растру зображення ставиться у відповідність піксель растру екрану монітора. З іншого боку, це означає, що зображення розміром 100×100 пікселів матиме на екрані однакові розміри незалежно від заданої для нього роздільної здатності, 300 чи 72 ppi. Отже, *роздільна здатність зісканованого зображення* – це число

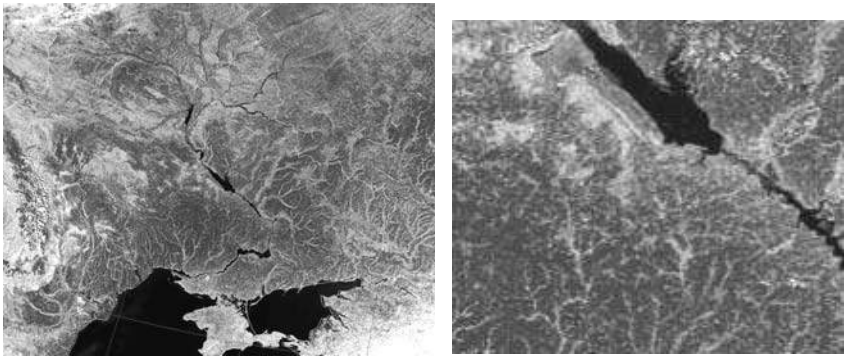
пікселів на лінійному дюймі зображення, яке вимірюється в ppi – "пікселях на дюйм" [71].

*Роздільна здатність космічних та аерофотознімків* – це величина об'єкта на місцевості, який роздільно читатиметься в одному пікселі екранного зображення або розміри найменшого об'єкта, що розпізнають за його змістом, на один піксель. На відміну від звичайних растрових зображень, у растрі космічного зображення кожен піксель містить значення світлової енергії, яка відбивається від ділянки земної поверхні. Відеокарта системного блоку комп'ютера перетворює ці дані у видиме зображення.

Оскільки знімання проводять у кількох каналах електромагнітного спектра, то в програмах з обробки дистанційних даних знімки подані кількома каналами (від трьох у SPOT-5 до семи у Landsat-7). У графічних редакторах космознімки виводять на екран як звичайний растр.

Роздільна здатність знімка залежить від апаратури дистанційного знімання, від стану природного середовища на момент знімання і наступної обробки первинної інформації. Роздільна здатність лімітує розмір і характер об'єктів, які розпізнають на знімках (рис. 4.39). Деякі особливо великі об'єкти виявляються лише на глобальних знімках, при цьому інші об'єкти є надто малими, щоб відобразитися на таких знімках, ще інші мають не чіткі обриси. Зокрема, на знімках низької роздільної здатності (більше 1 км/пікс) розрізняють контури берегової лінії, масиви лісів, сільськогосподарських угідь, великі ріки. Якщо збільшувати на екрані такі знімки, то ми не побачимо елементів зазначених об'єктів, наприклад, полів чи лук, а зображення втратить чіткість. Роздільну здатність космічних знімків закладають наперед, конструюючи відповідні апаратні засоби знімання. Окрім знімків малої роздільної здатності, на Землю поступають знімки середньої і високої роздільної здатності. На таких знімках відображаються поля, луки, ліси, поселення, дороги, малі ріки та ін. об'єкти відповідної розмірності. На них краще розпізнають границі площинних об'єктів і протяжність лінійних. Слабо виділяються точкові об'єкти.

На знімках високої роздільної здатності виявляють деталі окремих об'єктів (рис. 4.40). Найвища роздільна здатність знімків з космосу – 42 см на місцевості.



*а* *б*

Рис. 4.39. Космознімок з супутника NOAA низької роздільної здатності: *а* – сцена на територію України, *б* – фрагмент сцени *а*.

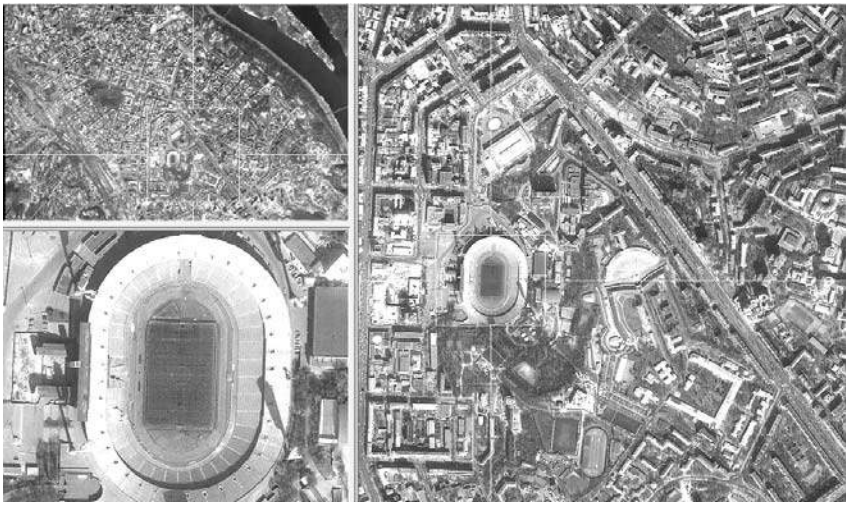


Рис. 4.40. Космознімок зі супутника QuickBird надвисокої роздільної здатності.

Перевагою програмних засобів інтерпретації знімків, порівняно з інструментальними і візуальними дослідженнями, є можливість кількаразового збільшення зображення. Це дає змогу аналізувати природне середовище на різних рівнях генералізації, фіксувати положення одних об’єктів відносно інших, виявляти

великі об'єкти і наближувати їхнє зображення до окремих деталей. Від цього залежать можливості інтерпретації об'єктів різного призначення та змісту. На екран монітора можна виводити кілька вікон, у яких розміщене одне і те ж зображення, але з різною величиною наближення. Це пришвидшує орієнтування спостерігача в площині знімка і визначення розміщення об'єкта.

### *4.7.2. Опрацювання космічних та аерознімків у програмах – редакторах растрової графіки*

У програмах-редакторах растрової графіки Adobe Photoshop, Corel Photopaint, Photo Filter та ін. виконують найбільш прості операції з растровими зображеннями, зокрема, проводять тонову або кольорову корекцію, усувають різного роду дефекти, при тематичному дешифруванні аерофото- і космічних знімків виконують контурне чи тонове виділення об'єктів.

Під *тоновою корекцією* розуміють зміну тону пікселів растрового зображення так, щоб їх розподіл у тоновому діапазоні конкретного зображення відповідав бажаному. Часто на екрані монітора після сканування знімки мають спотворений тоновий діапазон дуже темний або дуже світлий, недостатньо або надмірно контрастний. Безпосередньо змінити характеристики яскравості і контрастності можна, викликаючи меню програми Photoshop – Image / Adjustments / Brightness and Contrast (Зображення / Налаштування / Яскравість і Контраст). Маніпуляції з двома повзунками в діалоговому вікні цієї команди дають змогу без особливих зусиль помітно підвищити якість зображення, видимого на екрані. Зміна тону відбувається рівномірно за всією площею зображення. В результаті яскравість і контрастність змінюються на однакову величину скрізь – і в тих місцях, де це необхідно, і там, де цього не потрібно, і там, де цього робити категорично не можна. Наприклад, якщо ми хочемо збільшити яскравість зображення так, щоб 10-% відтінки сірого стали білими, то як побічний ефект 100-% відтінки сірого стануть 90-% відтінками, а діапазон тіней посіріє, втрачаючи контрастність.

Від цих (і від багатьох інших) недоліків позбавляються, скориставшись замість корекції яскравості і контрасту, *корекцією тонового діапазону за рівнями*. Найважливішим інструментом цього

коректування є гістограма тонів. *Гістограмою тонів, або гістограмою розподілу рівнів*, називають графічне зображення відомостей про кількість пікселів з тим або іншим значенням параметра основного кольору у складі растрового зображення. Гістограма є типом діаграми, складеної з розташованих впритул один до одного вертикальних стовпців, нижні краї яких вирівняні по горизонталі, а висота (у разі гістограми тонів) відповідає кількості пікселів, які мають один і той самий рівень тону. Всього в гістограмі тонів налічується 256 стовпців. У більшості програм растрової графіки під власне діаграмою відображаються шкала тонів і статистичні відомості про склад тонів у зображенні.

Корекцію тонового діапазону за рівнями проводять за трьома однаковими за шириною піддіапазонами: тіні, середні тони, світло. Вона полягає в перерозподілі пікселів зображення між цими трьома піддіапазонами. Перерозподіл виконується шляхом фіксації на шкалі тонів місцеположення трьох умовних крапок: чорної, білої і середньої. Змінити положення чорної і білої крапки можна, вказуючи у вікні “Рівні” значення відповідного пікселя або пересуваючи повзунки, що дає змогу досягти вищої точності (рис. 4.41).

Розглянуті способи тонової корекції за трьома піддіапазонами дають змогу досягти задовільних результатів не у всіх випадках. Іноді потрібно виконати тонову корекцію тільки в порівняно вузькій частині діапазону тонів, наприклад, освітлити тільки найтемніші фрагменти в тінях, не зачіпаючи середні тони, і підсилити

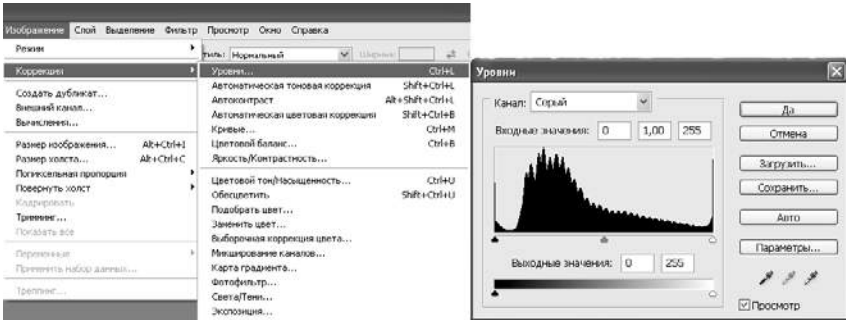



Рис. 4.41. Меню коректування фототону зображень шляхом зміни рівнів у програмі Adobe Photoshop.

контрастність у світлі. Для такої роботи зручно скористатися *тоновою корекцією по градаційній кривій*.

*Градаційною кривою* називають відображення графічно заданої залежності рівня тону пікселя відкоректованого зображення від рівня тону того ж пікселя початкового зображення. Градаційна крива є графіком функції тонової корекції, на якому горизонтальній осі відповідають тони початкового зображення, а вертикальній – тони після корекції (рис. 4.42). Дешифрувальник може побудувати градаційну криву для космо- чи аерофотознімка самостійно, формуванням на ній точки зламу і перегину і їхнім переміщенням. Координатна сітка, на якій побудована градаційна крива, має два вимірювання – по горизонталі і вертикалі. Переміщення будь-якої крапки градаційної кривої вгору затемняє зображення, вниз – освітлює його. При цьому якщо крайня ліва (початкова) і крайня права (кінцева) точки градаційної кривої залишаються на своїх вихідних позиціях, чорні піксели зображення залишаються чорними, а білі – білими.

Якщо графік формують переважно ламаними лініями, то зображення стає контрастним, деталі більш чіткі. Якщо градаційна крива стає плавною після зміщення повзунків, то контрастність знижується, деталі зникають. S-подібна побудова кривої робить світло яскравішим, тіні – густішими, а сірі тони контрастніши-

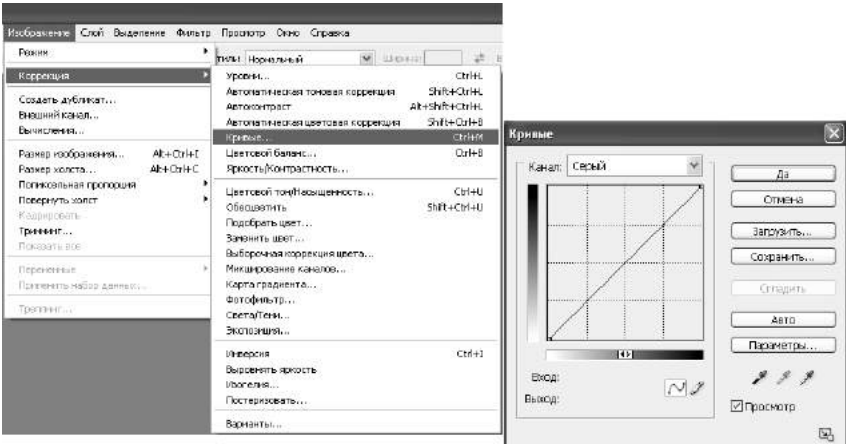



Рис. 4.42. Меню коректування фототону зображень градаційною кривою в програмі Adobe Photoshop.

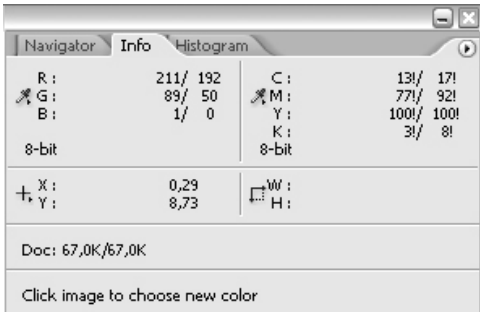



Рис. 4.43. Вікно інформації про зміни у зображенні.

ми. Завдяки стисненню чи розтяганню окремих діапазонів, можна більш увиразнити наявні деталі зображення, проте додати нові деталі неможливо. Отже, в діалоговому вікні “Криві” редагують стільки рівнів яскравості, скільки потрібно, і відрегульовують їх досить точно.

*Коректуванням кольорового зображення* називають таке перетворення растрового зображення, за якого яскравість пікселів залишається незмінною – змінюється їхній колір. Найбільше під час редагування кольорових зображень використовують підменю Color Balance в меню Image/Adjustment. Щоб остаточно не втратити якість зображення, зміни контролюють у додатковому вікні “Info” (Інформація) (рис. 4.43). Під час переміщення курсору по зображенні в цій палітрі відображаються числа, які відповідають рівню тону: перед косою рискою – тон вихідного зображення, поза нею – рівень тону після коректування.

У вікні Color Balance оперують групою балансу тонів (Tone Balance) (рис. 4.44). У цій групі встановлюють почергово перемикач на тіні (Shadows), середні тони (Midtones), світло (Highlights) і

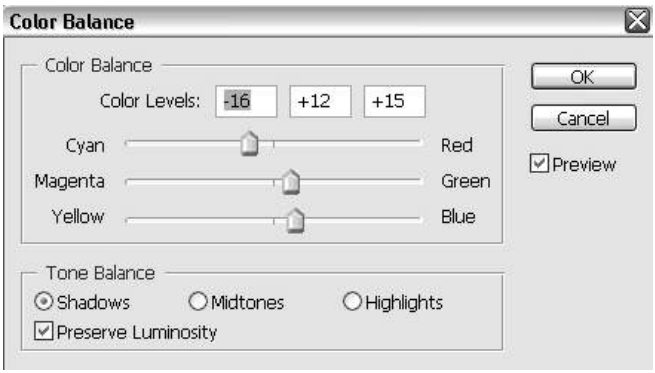



Рис. 4.44. Вікно коректування кольорового зображення.

рухають повзунками до відповідного значення. При цьому галочка "Preserve Luminosity" (Зберігаючи яскравість) повинна бути ввімкнена. Оптимальна схема балансування кольорів за параметрами RGB така: у світлі варто збільшити значення двох параметрів до найбільшого з трьох параметрів; у діапазоні середніх тонів приводять всі параметри до їхнього середнього арифметичного значення; в тінях зменшують значення інших параметрів до мінімального значення.

Окрім редагування кольорового балансу, у програмі Adobe Photoshop є інші опції з редагування кольору: *Hue/Saturation (Тон/Насиченість)* міняє фундаментальні колірні характеристики зображення; *Desaturate (Знебарвити)* повністю усуває колір зображення (знімок набуває вигляду режиму градацій сірого, хоча власне режим не змінюється); *Match Color (Підігнати колір)* виконує підстроювання колірних параметрів зображення під параметри іншого відкритого зображення; *Replace Color (Замінити колір)* (а також інструмент *Color Replacement* (Замінник кольору)) служить для зміни тону, насиченості і яскравості у вибраних областях або на ділянках зображення; *Selective Color (Вибірковий колір)* служить для настроювання блакитною, пурпурною, жовтою або чорною компонент у вибраному кольорі; *Channel Mixer (Змішувач каналів)* дає змогу управляти режимами змішування колірних каналів зображення; *Gradient Map (Карта градієнта)* замінює кольори на основі еквівалентного діапазону сірої шкали зображення, замінюючи його вибраною градієнтною заливкою; *Photo Filter (Фотофільтр)* імітує дію реального коректувального фотофільтру; *Variations (Варіації)* маніпулює тоном і насиченістю, надаючи зразки для вибору остаточного варіанту корекції кольору.

Коректування кольору можна також проводити, використовуючи панелі "Рівні" і "Криві". Редагування при цьому здійснюють за кожним кольоровим каналом окремо.

Отже, під час роботи з аерофото- і космічними знімками, введеними у комп'ютер шляхом сканування, для поліпшення якості розпізнавання чорно-білих зображень використовують три способи коректування їхньої яскравості і контрасту: безпосередньої зміни у діалоговому вікні "Яскравість-Контраст", розраховуючи і вказуючи параметри у вікнах "Криві" або "Рівні". Для кольорових знімків застосовують різні способи коректування кольорового ба-

*а*

*б*

Рис. 4.45. Усунення різниці фототону двох сусідніх аерофотознімків та інших небажаних об’єктів способом клонування:
*а* – фрагмент двох аерофотознімків у місці стику до редагування,
*б* – після редагування.

лансу всього зображення, так і окремих кольорів, а також заміни одних кольорів іншими. Таке редагування використовують для увиразнення тих чи інших об'єктів і кращого їхнього дешифрування. Корекції космо- та аерофотознімків особливо важливими є тоді, коли після інтерпретації їх готують на видрук.

Часто на фотографічних космічних і аерозображеннях проявляються різного роду дефекти, пов'язані з технікою знімання (відблиски на воді) чи технікою видруку (відбитки пальців, плями на фотопапері та ін.). Плями можна замаскувати, користуючись інструментом *"Clone Stamp" (Клонуючий штамп)*. Тримаючи натиснутою клавішу "Alt", вибирають сусідню з даною область, на якій немає дефектів. Клацанням лівої кнопки миші встановлюють вибраний фрагмент на місце, яке замасковують. Для більшої подібності сусідніх областей зображення збільшують, а величину "Штампу" ставлять невеликою, сумірною з елементами області маскування. Область для клонування повинна бути однакового відтінку фототону чи кольору, що й область навколо ділянки, яку замасковують. Тоді добиваються реальності образу, який замаскували (рис. 4.45). Спосіб клонування використовують також у випадках, коли треба "зшити" ряди аерофотознімків у фотосхему на екрані монітора й усунути периферійні лінії.

Поширеним способом опрацювання знімків у растрових редакторах є *рисування границь* об'єктів та різних виділів у площині зображення. Для цього використовують інструмент "Brush" (Кисть) чи Pencil (Олівець), які відрізняються формою лінії, яку креслять (рис. 4.46). Крім форми, можна задати також розмір, жорсткість, густоту мазків, округлість і кут орієнтації кисті. Перш, ніж рисувати контури, треба вибрати колір лінії. На чорно-білих знімках спочатку виставляють режим палітри кольорів RGB, CMYK чи ін. Далі у нижній частині вікна "Tools" (Інструменти) з двох кольорових зразків вибирають колір переднього плану . На задньому плані цього зразка вміщений колір фону, який використовує інструмент "Eraser" (Гумка), а також він з'являється під час вирізання фрагмента. Інструмент "Кисть" використовує колір переднього плану, який можна сформувати у палітрі кольорів або взяти зразок кольору із зображення інструментом "Eyedropper" (Піпетка). На темних кольорах треба рисувати світлими відтінка-

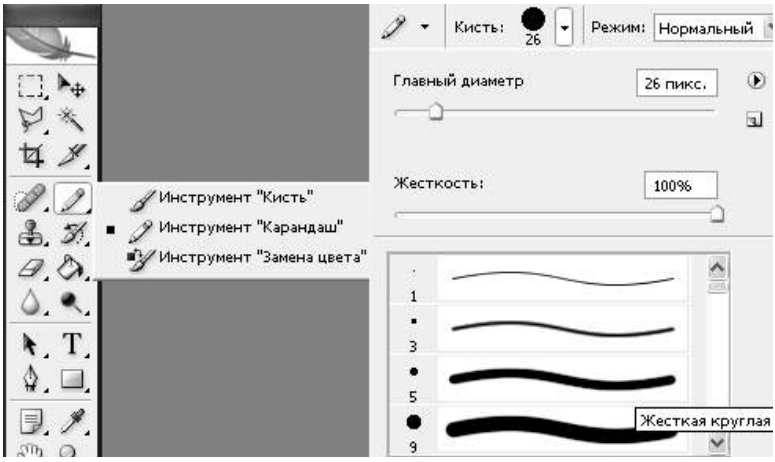



Рис. 4.46. Вибір інструмента рисування границь.

ми, на світлих кольорах, відповідно, темними, на темному фоні чорно-білих зображень ефектно виглядають білуваті границі.

Таким чином, ми розглянули способи виведення на екран монітора аерофото- і космічних знімків, основи побудови якісних зображень та головні прийоми їхньої обробки у програмному пакеті Adobe Photoshop. Подібно до цієї програми, з невеликими відмінами, функціонують інструменти та команди в інших популярних програмах з редагування растрової графіки.

### *4.7.3. Опрацювання аеро– і космічних знімків у ГІС–растрових редакторах*

Можна виділити два види програм з автоматичного дешифрування знімків: програми тематичного та фотограмметричного опрацювання зображень [38]. Програми з фотограмметричної обробки, для прикладу Socet Set, використовують, здебільшого, для геодезичних обчислень, тоді як географічні дослідження потребують програм з тематичної обробки знімків.

Дані дистанційного зондування, зазвичай поставляють у спеціальних форматах, що містять, крім власного зображення, також додаткову інформацію про умови знімання, які не можуть бути передані в растрових файлах загального призначення, таких як

.jpg, .bmp, .tiff. Невикористання ж цієї інформації значно знижує споживчу цінність даних дистанційного зондування, особливо сучасних цифрових космічних знімань, і зменшує можливості відбору корисної інформації із зображення. Крім того, дані дистанційного зондування часто мають декілька незалежних зон знімання, число градацій яскравості в одній зоні тут більше ніж 256. Вся ця специфіка знижує ефективність використання для роботи з космічними матеріалами графічних програмних пакетів чи стандартних ГІС, які використовують растр просто як підкладку. Вся ця специфіка закладена у спеціалізованому професійному пакеті для роботи з дистанційними даними, яким є Erdas Imagine.

Серед користувачів аерокосмічної інформації програма Erdas Imagine найбільше використовується для автоматичної обробки цифрових растрових даних. Вона призначена для попереднього опрацювання, фільтрації, класифікації й аналізу зображень. Операції перетворення зображень виконують у такій послідовності:

– введення і первинне формування зображень (перетворення в цифрову форму, вміщення у файл зображення службової інформації);
– попереднє опрацювання зображення: геометрична корекція; радіометрична, спектральна і частотна корекція; приглушення шумів;
– тематичне опрацювання: арифметичні та логічні операції над зображенням; фільтрація зображення з метою контрастування, згладжування, виділення контурів, лінійних елементів, порогового опрацювання; класифікація зображень (за спектральними і геометричними ознаками), яку може проводити оператор, або ж вона відбувається автоматично чи інтерактивно;
– імпорт опрацьованих даних у ГІС: створення тематичних шарів (наприклад, за допомогою перетворень “растр–вектор”); уведення результатів класифікації в атрибутивну базу даних.

На попередньому етапі вводять, зчитують та оцифровують фотоінформацію, у разі теле- чи сканерного знімання виконують прийом цифрової інформації. Дані у вигляді цифрової передачі широкосмуговими каналами зв’язку передають споживачам. Формат космознімків, одержаних безпосередньо з супутника, є

дуже специфічним, і для конвертування його у формат, який читають ГІС, використовують програми NOAA-TMI (для знімків з супутника NOAA), або HRPTREADER для знімків з інших супутників. Далі імпортують зображення в програму ERDAS окремо за кожним каналом.

Після отримання інформації на екран монітора виконують процедури поліпшення якості і корекції зображення, які полягають у вирівнюванні масштабу, усуненні перешкод систематичного і випадкового характеру. Наприклад, зменшують або зовсім знімають смугастість зображення, зумовлену сканувальним способом його отримання. Фільтрують перешкоди випадкового характеру – збійні рядки, розфокусування, накладення шумів та ін. До процедур поліпшення зображення належить фотометрична корекція, яка дає змогу уникнути перешкод в оптичній щільності зображення, викликаних впливом атмосфери. До кола завдань атмосферної корекції відносять фільтрацію напівпрозорої хмарності, забезпечення ідентичності передачі градації оптичної щільності зображення по всьому кадру. Знімання з космосу виконуються різною апаратурою при різних кутах орієнтації літального апарата. Тому для ефективної роботи з космічним зображенням на попередньому етапі проводять геометричну корекцію зображення. Вона полягає в усуненні спотворень кута нахилу оптичної осі, впливу рельєфу, мінливості масштабу у полі зображення. Тобто здійснюють трансформацію знімка в задану проекцію з єдиним масштабом по всьому полю зображення. Крім того, можна виконати процедуру введення в космічне зображення сітки географічних паралелей і меридіанів.

На екрані монітора космічний знімок зображений у вигляді багатоканального зображення у палітрі RGB-кольорів. Програмний пакет Erdas Imagine містить інформацію не тільки про кольорові діапазони, й про спектральні, в яких виконувалось знімання зі супутника. Комбінація спектральних каналів у цьому програмному пакеті зумовлює кольорову гаму на зображенні. Об'єкти того чи іншого виду природокористування відображаються у кольорі, який відповідає певному спектральному діапазону, у якому ці об'єкти мають максимум відбиття електромагнітних хвиль. Треба чітко уявляти, що обробка космічного зображення не дає змоги отримання нової інформації, оскільки відображене

на початковому зображенні випромінювання не змінюється. Методи корекції і комбінації каналів лише вибірково увиразнюють те, що є на зображенні, ту або іншу інформацію, допомагають її витяганню, роблять її видимою. При цьому підвищується точність та об'єктивність дешифрування, знижується трудомісткість самого процесу.

Для зміни кольорів спектрального образу об'єктів у програмі Erdas Imagine треба змінити порядок каналів у меню Raster/Band Combinations. Космознімки зі супутника SPOT мають три спектральних канали, Landsat – сім, тому найбільш видозмінюється територія на космознімках Landsat зі зміню порядку відображення каналів. Наприклад, якщо зафіксувати порядок "3, 2, 1", то місцевість на знімку відобразиться у природних кольорах, об'єкти земної поверхні виглядають схожими на те, як їх сприймає людське око, оскільки у цій комбінації використовуються канали видимого діапазону. Здорова рослинність виглядатиме зеленою, хвора – коричневою і жовтою, зорані поля – світлими, дороги – сірими, кар'єри та виходи порід – білястими кольорами.

У разі стандартної комбінації каналів "4, 3, 2" ("штучні кольори"), рослинність відобразиться у відтінках червоного, міська забудова – зелено-блакитним, а колір ґрунтів змінюватиметься від темно до світло-коричневого кольорів. Лід, сніг і хмари виглядатимуть білими або ясно блакитними. Хвойні ліси відобразяться більш темними червоними кольорами, порівняно з листяними.

Різні комбінації каналів невидимих діапазонів з видимими дають дешифрувальнику багато інформації про об'єкти місцевості. Для прикладу, два інфрачервоних канали та один видимий застосовують для відокремлення боліт. Певні комбінації спектральних діапазонів увиразнюють ті чи інші об'єкти, які при інших поєднаннях не виділяються. Зокрема, в каналах "7, 5, 3" добре фіксують ділянки підвищеної температури, наприклад, вулкани чи пожежі; комбінація "7, 4, 2" – дає хороші результати при інтерпретації виходів порід на поверхню, пустель та опустельнених територій; "4, 5, 3" – використовують для дешифрування ґрунтів, заболочених і перезволожених земель; "5, 4, 3" – найкраща комбінація для вивчення стану рослинного покриву, де здорова рослинність відображається яскраво-зеленими кольорами; "5, 4, 1" – використовують для аналізу сільськогосподарських культур;

"7, 5, 4" – для дослідження стану атмосфери, "7, 3, 1" – відміни у гірських породах та ін.

Отже, найпростіший спосіб ідентифікації об'єктів у растрових ГІС полягає у зміні порядку представлення спектральних діапазонів на екрані монітора і відповідній зміні кольорів на зображенні. Різні за характером об'єкти, які до того часу зливалися на зображеннях між собою, після зміни комбінації каналів набувають визначених кольорів і стають видимими на фоні навколишньої місцевості.

Для дослідження стану рослинного покриву використовують перетворення зображень за вегетаційним індексом NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). NDVI є показником густоти рослинності і визначають як відношення різниць інтенсивностей відбитого світла в червоному та інфрачервоному діапазоні до суми цих інтенсивностей. У червоній області спектра (0,6–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин, а в інфрачервоній області (0,7–1,0 мкм) знаходитися область максимального віддзеркалення клітинних структур листка. Тобто висока фотосинтетична активність (пов'язана, зазвичай, з густою рослинністю) приводить до меншого віддзеркалення в червоній області спектра і більшому в інфрачервоній. Відношення цих показників один до одного дає змогу чітко відокремлювати й аналізувати рослинні угруповання від інших природних об'єктів.

Перетворення зображень за індексом NDVI виконують у модулі Interpreter програми Erdas Imagine. У меню Spectral Enhancement вибирають підменю Indices. Далі працюють у діалоговому вікні для задання процесу перетворення.

Важливим етапом роботи у ГІС є *прив'язка знімків до географічних координат*, яку ще називають геокодуванням чи ректифікацією. Саме тим, що растрові ГІС працюють з геокодованими даними, вони відрізняються від графічних растрових редакторів типу Adobe Photoshop. Геокодування виконують у модулі програми Erdas Imagine *Data Preparation/Image Geometric Correction* (Підготовка даних/Геометричне виправлення зображень) або з меню вікна Raster/Geometric Correction. Суть процесу геокодування полягає в тому, щоб нанести на знімок точки з точними географічними координатами, які вводять з топографічної карти або переносять

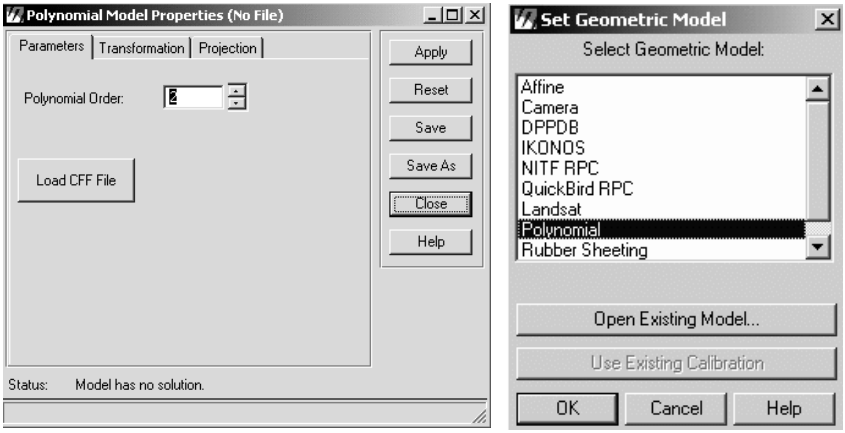



Рис. 4.47. Вікна програми Erdas Imagine
для зазначення порядку полінома.

з цифрового геокодованого знімка чи з даних навігаційного приладу GPS.

Процес прив'язки починають з вікна Set Geometric Model (встановити геометричну модель). У цьому вікні вибирають Polynomial, після чого відкривається вікно Polynomial Model Properties (рис. 4.47). У закладці Polynomial Order вводять порядок полінома, який дорівнює два. Поліном описує рівняння, яке використовують для побудови поверхні найкращого наближення. Тип рівняння (степінь полінома) визначає величину хвилястості поверхні. У разі степеня полінома один, поверхня, що буде геокодована, виглядатиме як площина, витягнута в одному напрямі до вихідного покриття. Поліном другого порядку свідчить, що поверхня матиме один вигин, а найскладнішою буде поверхня, побудована за третім порядком полінома (рис. 4.48). Космознімок, який містить спотворення зображення через рельєф, нахил носія і неточності апаратури зондування варто прив'язувати, зазначивши вищий порядок полінома.

Далі, в закладці Projection вибирають Add/Change Projection, у діалоговому вікні Projection Chooser (Обирач проекції) необхідно визначити систему координат, в одиницях якої будуть подані значення GCP-точок, що вводяться (точок прив'язки). Найзручніше виконувати прив'язку у метричній системі координат. У

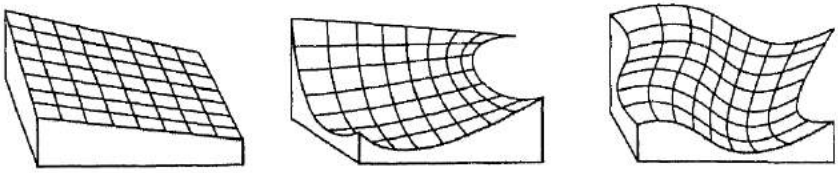


Рис. 4.48. Поверхня, яку розраховує поліном відповідно першого, другого та третього порядку [76].

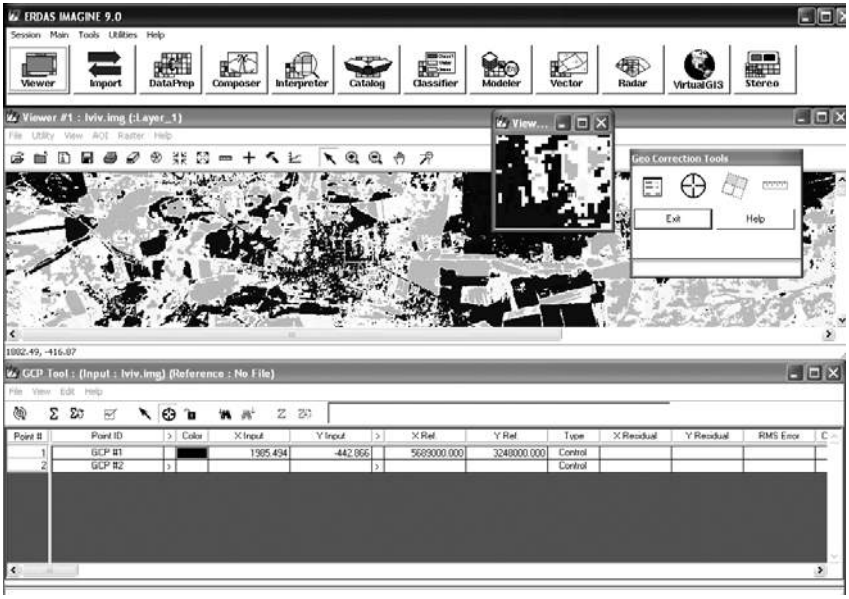



Рис. 4.49. Вікна Erdas Imagine для введення координат точок.

діалоговому вікні Projection Chooser у вкладці Custom із списку Projection Type вибирають проекцію Transverse Mercator і визначають: Spheroid name (назва сфероїда) – Krasovsky, Datum name (система кординат) – Pulkovo 1942, Scale factor (масштабний коефіцієнт) = 1, Longitude (довгота) = 0, Latitude (широта) = 21, False easting (похибка східного напряму) = 4 500 000, False northing (похибка північного напряму) = 0.

Після того, як у вікні GCP Tool Reference Setup ввели джерело набору точок, з’являються кілька вікон для виставлення координат (рис. 4.49). У межах одного знімка задають не менше 15–20 точок

для геокодування з точністю до 0,01 м. Програма автоматично проведе прив'язку, якщо у вікні Resample виставити ім'я вихідного файлу і вибрати метод передискритизації Resample Method – Nearest Neighbor. Також, щоб в процесі розрахунку статистики нульові значення пікселів були проігноровані потрібно поставити галочку поряд з полем Ignore Zero in Stats. Стан процесу автоматичного геокодування простежується у вікні Job Status dialog. На завершення процесу вкаже кнопка "OK" і статус "100% complete", після чого знімок готовий для проведення подальших з ним операцій.

Важливою функцією растрових ГІС є класифікація космічних зображень, яку виконують у модулі *Classifier*. Класифікація зображення означає сортування, розподілення за класами, елементів зображення (пікселів). Сортування пікселів ґрунтується на значеннях його атрибутів (digital numbers), якими є спектральні характеристики природних об'єктів. Цей спектр на космознімках зафіксований у вигляді палітри кольорів, а також у вигляді таблиць і графіків у базі даних програми. На підставі спектральних даних виконують класифікацію видів та об'єктів природокористування, що відобразилися на знімках. Тобто якщо піксель задовольняє деяку умову класифікації, його зачисляють до певного класу, який відповідає цій умові [119].

На знімках гірської місцевості чи розчленованої височини відображається багато тіней. Для поліпшення якості класифікації таких територій перед класифікацією зменшують їхню затіненість використанням опцій топографічного вирівнювання зображень (*Topographic Normalize*). Додаткове програмне забезпечення *Athcor* усуває хмари та тіні від них і цим забезпечує відмінну оглядовість знімків.

В Erdas Imagine передбачено два способи класифікації. Перший спосіб (*unsupervised classification*) – класифікація без навчання, полягає у тому, що дешифрувальнику відомі спектральні характеристики природних утворень, зображених на космознімку, і він задає їх для автоматичного розпізнавання. Такі характеристики отримують унаслідок спеціального спектрометричного знімання поверхні Землі та введення їх у базу даних комп'ютера. Якщо таких даних немає, то програма виконує класифікацію зображення згідно з кількістю заданих дешифрувальником класів (рис. 4.50).

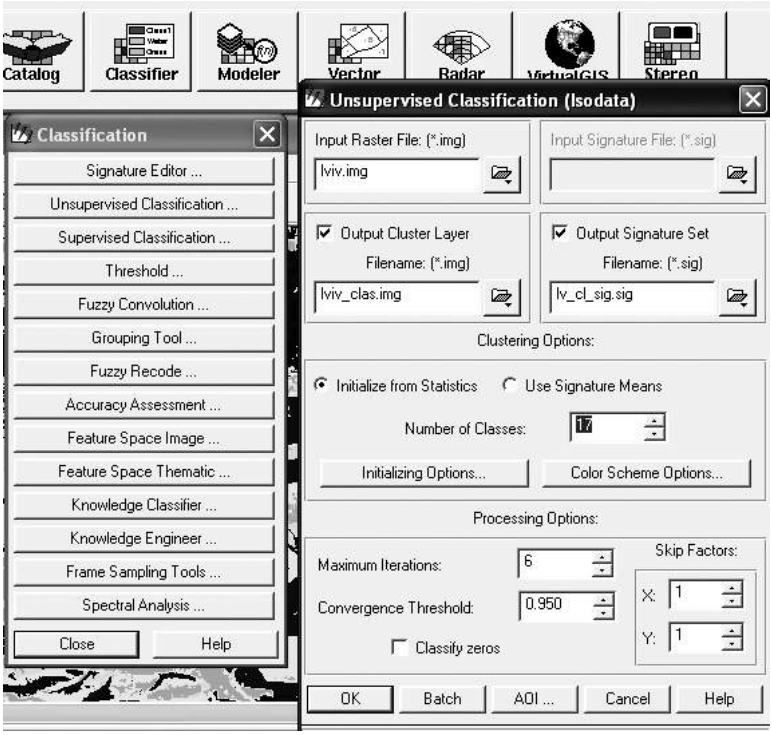


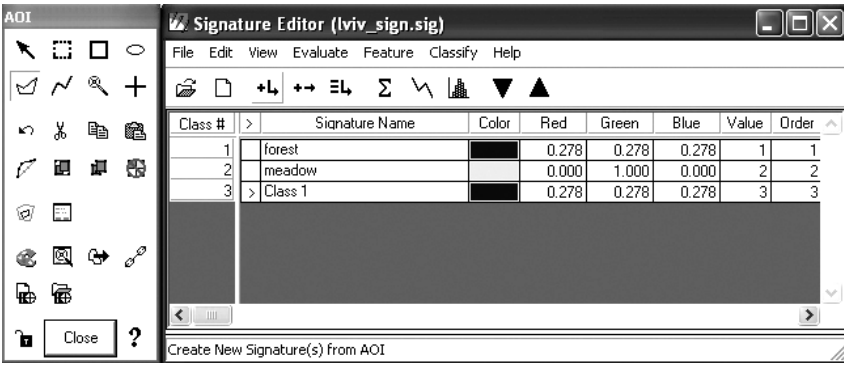

Рис. 4.50. Діалогове вікно процесу класифікації “без навчання”.

Користувач зазначає назву вхідного файла, який варто класифікувати, назву вихідного, класифікованого, і назву файла сигнатур, у якому програма задасть у табличній формі кількість зазначених класів та колір, що їм присвоєно у параметрах RGB.

Алгоритм, який використовують для цього різновиду класифікації (безеталонної), ґрунтується на кластерному аналізі. Для формування кластерів використовують формулу мінімальної спектральної відстані. Пікселі з різним спектральними показниками належать до одного чи різних класів залежно від подібності їхніх значень. Кластеризація починається з мимовільно заданих значень (середніх) або середніх значень, узятих з еталонів. Після віднесення всіх можливих пікселів до одного з класів центри класів зсуваються, і процес повторюється повністю спочатку (наступна ітерація). Процес триває доти, доки не буде досягнуто макси-

мальної кількості ітерацій або максимального відсотка пікселів, які не змінили класу (межа збіжності – convergence threshold). Наприклад, якщо ct=0,95, то це означає, що процес кластеризації закінчиться, як тільки кількість пікселів, що не змінили класу між ітераціями, досягне 95%. Тобто якщо тільки 5% чи менше пікселів змінять клас, процес класифікації закінчиться. Початкові центри класів розраховують шляхом обчислення заданої кількості середніх значень (кількості класів) по всьому зображенню вздовж діагоналі (diagonal axis) або шляхом обчислення кількості середніх значень за растром, який визначають методом головних компонент [124].

Другий спосіб (*supervised classification*) – класифікація з навчанням, відбувається за допомогою навчання за деякими еталонами зі створенням для кожного з них певної сигнатури. Сигнатура – це еталон, область із заданим класом, яку використовують для подальшої класифікації з навчанням за цим еталоном. Таблицю сигнатур знаходять у загальному меню Classifier, відкриваючи підменю Signature Editor. Сигнатури надалі застосовують для визначення центрів класів. На зображенні створюють новий тематичний шар AOI в меню File/New, і за допомогою інструмента AOI-polygon виділяють еталони у межах кожного виду природокористування. У таблиці редактора сигнатур (Signature Editor) програма присвоює їм значення певних класів (рис. 4.51). Задають




*а* *б*

Рис. 4.51. Програмні вікна для означення еталонів:
*а* – вікно інструментів тематичного шару AOI,
*б* – вікно-таблиця редактора сигнатур.

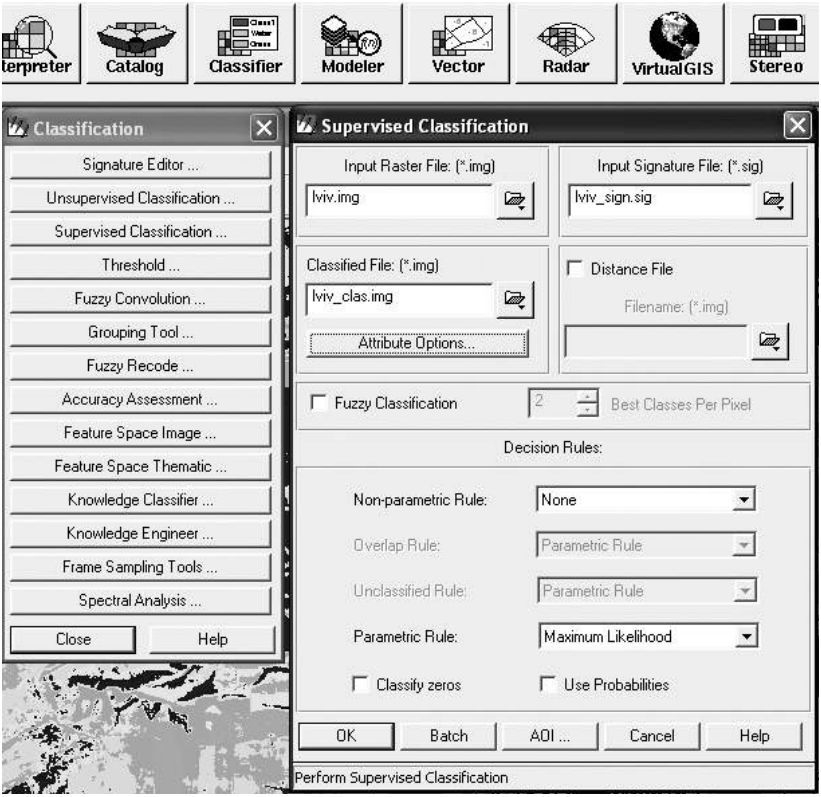



Рис. 4.52. Діалогове вікно процесу класифікації “з навчанням”.

від 2 до 255 класів. Кожному класу присвоюють колір і називають його.

Після визначення еталонів на зображенні в модулі Classifier вибирають Supervised Classification. Відкривається вікно, в якому треба задати вхідний файл для подальшої класифікації, файл утворених сигнатур і назву вихідного файла (рис. 4.52).

Далі зазначають правило (спосіб) класифікації (Parametric Rule). Класифікацію виконують за такими параметричними правилами: максимальної подібності, відстані Махалланобіса і мінімальної відстані. Непараметричні правила теж використовують у класифікації – це просторова ознака і правило паралелепіпеда. Досвід показує, що найбільш точним під час класифікації кос-

мознімків Landsat є спосіб максимальної подібності. Це означає, що пікселі, які перебувають за своїми спектральними характеристиками на границях двох класів, увійдуть до того класу, який має максимально подібні до них значення. Запускають процес класифікації натисканням кнопки "OK".

Після класифікації перевіряють точність виділення класів. Є сім способів перевірки точності:

1. Попереджувальна перевірка (Alarm) – виділення пікселів, які, можливо, будуть зачислені до класів, визначених сигнатурами. Належність чи неналежність пікселя до класу відбувається за правилом паралелепіпеда (Parallelepiped decision rule).

2. Матриця перетинів (Contingency Matrix) – метод перевірки сигнатур, створених з AOI на підставі зображення. Цей метод перевіряє значення пікселів у межах наявних сигнатур. При цьому визначають, які з класів віддешифровані погано, а які добре. Класифікацію, точність якої понад 85 % уважають доброю, 60–85 % – задовільною, нижче 60 % – неточною.

3. Створення маски із сигнатури просторової ознаки – метод, що відтворює на зображенні маску з сигнатури, отриманої з графіка просторової ознаки: Feature\ Masking\ Feature spase to image.

4. Об'єкти сигнатур (Feature\Objects) – метод зображення сигнатур у просторі ознаки, який використовують для візуального визначення сигнатур, що перетинаються.

5. Метод перевірки гістограм – побудова гістограми для однієї чи більше сигнатур за одним чи більше каналами: View\ Histogram.

6. Подільність сигнатур (Evaluate\Separarability) – метод розрахунку статистичної різниці між двома сигнатурами, значення різниці відображає, наскільки одна сигнатура віддалена від іншої.

7. Перевірка статистики – розрахунок статистики для вибраної сигнатури: View\Statistics.

Якість класифікації (Evaluation) оцінюють такими методами:

1) заданням прозорості (classification overlay) – відключають (роблять прозорими) всі класи, крім того, який перевіряють, і керують його видимістю;

2) методом порогового значення (thresholding), тобто визначають, які з пікселів були класифіковані неправильно, такі пікселі

переносять у клас "некласифіковані", щоб надалі опрацювати і знову класифікувати;

3) перекодуванням (recode classes);

4) оцінкою точності класифікації (accurancy assessment) [124].

За допомогою класифікації на космічних зображеннях виділяють різні види використання земель: ліси, луки, орні землі, болота, забудову, водні об'єкти. Деякі спеціальні операції дають змогу розділити водні об'єкти за глибиною, а також території з різним ступенем забрудненості. Дешифрувальник має змогу виконувати такі обчислювальні операції, як визначення площ виділених класів, відстаней між пунктами, периметрів об'єктів тощо.

Для візуального відтворення об'ємного зображення рельєфу в програмі Erdas Imagine використовують модуль *Virtual Gis,* за допомогою якого за оцифрованими горизонталями створюють 3d модель території. На об'ємну модель накладають космічний, аерочи класифікований знімок і отримують наближене до реальності сприйняття зображуваної території. Крім того, у модулі Virtual Gis виконують віртуальний проліт над територією досліджень, записують його у форматі відеофайла, а потім проглядають.

### *4.7.4. Особливості роботи з дистанційними даними у векторних ГІС*

Найбільш поширеною програмою серед користувачів ГІС/ДЗЗ є програма ArcGIS. Головними її функціями є створення баз даних для різноманітних галузей знань та аналіз просторової інформації.

Деяка інформація зі світового країнознавства закладена в пам'ять програми, і її використовують як приклад картографічного відображення та пошуку інформації. Проте для спеціальних досліджень на конкретній території такі дані будують заново. Основою служать топографічні, різного роду тематичні карти і власне космічні чи аерофотознімки, які, нагадаємо, належать до растрових даних. Створення баз даних виконують після геокодування вихідної інформації.

*Створення даних* – це процес оцифрування чи векторизації вихідної інформації, яку зображають у вигляді точок, ліній чи полігонів. Точку характеризує пара координат *x, y*, лінію – набір з двох пар координат, що характеризують форму, полігон – набір

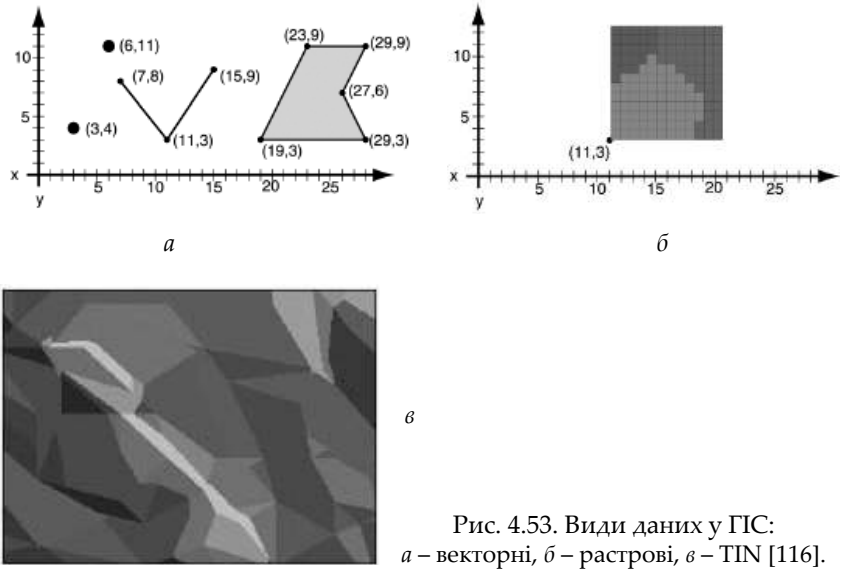


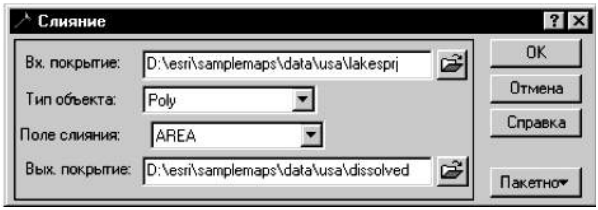

Рис. 4.53. Види даних у ГІС:
*а* – векторні, *б* – растрові, *в* – TIN [116].

координат, який визначає границю замкнутої області. Ці дані записують в окремі тематичні шари. Відрисованим точкам, лініям чи полігонам у спеціальних таблицях присвоюють їхнє цифрове значення чи текстове пояснення, які називаються атрибутами. Так утворюють векторні дані.

Окрім растрових і векторних даних, користувачі ГІС працюють з табличними даними, а також TIN. TIN (Triangulation Irregular Network (трикутна нерегулярна мережа)) – це модель даних, у якій реальна місцевість подана у вигляді мережі зв'язаних трикутників (рис. 4.53). Вони накреслені між нерівномірно поширеними точками, що мають координати *x, y, z* (охоплюють висоту над рівнем моря). Тріангуляційна поверхня дає змогу точніше, ніж растр, моделювати неоднорідні поверхні, які можуть різко змінювати форму на одних ділянках і поступово – на інших. Це пов'язують з тим, що на одних ділянках можна розмістити більше точок, на інших – менше. TIN будують після векторизації ліній і присвоєння їм значення висоти. Найчастіше цю модель даних використовують для представлення рельєфу. Поверх шару рельєфу накладають космічне чи аерофотозображення, яке дає змогу наочно відтворити на екрані монітора образ реальної місцевості.

Отримані бази даних стають підставою для подальшого аналізу, хоча створення бази даних може бути закінченим етапом досліджень. *ГІС-аналіз* – це спектр операцій з візуалізації одних компонентів за даними інших зазначених компонентів. Найпростішим видом аналізу є зображення розміщення заданих об’єктів у символах чи умовних знаках, відмінних від решти об’єктів, та їхній підрахунок. Другий вид аналізу передбачає вибірку чи формування запитів щодо певних об’єктів з бази даних. Запити дають змогу знайти і розглянути ці об’єкти. Третім видом ГІС-аналізу є пошук об’єктів поблизу заданих.

Проте найбільш поширеним способом аналізу географічної інформації в ArcGIS є *оверлейновий аналіз* (overlay, накладання) або




*а*

*б*

Рис. 4.54. Діалогові вікна
для виконання операцій накладання тематичних шарів:
*а* – вікно однопорядкового злиття, *б* – багатоступеневе накладання.

здатність програми комбінувати тематичні шари. Накладаючи шари з однією інформацією на шари з іншими даними, отримують нову інформацію. На тематичних шарах можуть бути зображені природні компоненти, такі як геологічна будова, рельєф, ґрунти, поверхневі води, рослинність тощо. Аналіз взаємозв'язків цих компонентів дає змогу виявляти природні закономірності у будові і характері території. Тематичними шарами можуть бути різні компоненти антропогенної діяльності, наприклад, шляхи сполучень, промислові і комунальні території, житлова забудова, об'єкти торгівлі, зелені території та ін. Виявляють при цьому найкоротші шляхи сполучень між заданими об'єктами, особливості їхнього поширення і співвідношення між об'єктами різних класів.

Існує кілька операцій з просторового накладання шарів – об'єднання, перетин, злиття, об'єднання за атрибутами, вирізання. Їх виконують за допомогою інструментів у формі діалогових вікон. Більш складні операції проводять, використовуючи підменю так званих Майстрів (рис. 4.54).

Рис. 4.55. Векторизація растрових зображень – виділення контурів будівель на космознімку для цілей міського земельного кадастру.

Зазначимо, що для виконання накладань використовують векторні дані, отримані цифруванням карт і знімків. Власне зображення з космосу чи літака використовують часто як основу, на якій креслять ті чи інші контури об'єктів (рис. 4.55). З космічних знімків отримують здебільшого інформацію про антропогенні об'єкти, а також природні компоненти середовища, добре виражені на знімках, такі як гідрологія, рослинність, геологічні структури, рельєф, рідше – ґрунти.

Цінними аспектами роботи в ГІС є змога автоматичного обчислення параметрів об'єктів, зокрема, вимірювання довжин ліній, визначення звивистості ліній, міри форми об'єктів, визначення периметрів і площ складних об'єктів. Ці обчислення забезпечують розуміння взаємовідносин між об'єктом і його оточенням. Зокрема, звивистість ріки пов'язана з такими функціями, як об'єм мулистих наносів, ухил ріки і витрата води. В свою чергу ці функціональні відношення засвідчують стан ріки – переважає акумуляція наносів, існує баланс чи ріка деградує.

У векторних ГІС на растрових зображеннях вимірюють також параметри об'єктів. Результат обчислень залежить від роздільної здатності знімків. Зокрема, довжину лінії визначають як добуток числа комірок на роздільну здатність зображення. Чим краща роздільна здатність, тим отримують точніші значення. Якщо розрізнення мале, і, наприклад, трапляються звивини ліній в одній комірці растра, то програма не врахує їх під час підрахунку (рис. 4.56). Тому обчислення векторних даних є точнішими в цьому плані.

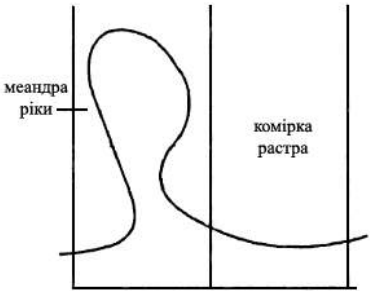



Рис. 4.56. Лінія об'єкта у растрі невисокої роздільної здатності [76].

Обчислення також проводять, використовуючи TIN. Користувач має змогу після отримання цифрової моделі рельєфу автоматично визначити експозиції схилів, їхній ухил, побудувати поперечний профіль, розрахувати взаємну видимість об'єктів та буферну зону між виділами.

Головні способи опрацювання растрових даних в ArcGIS – це систематизація (classified) за ко-

льорами та фільтрування – згладжування (smoothing) чи виокремлення (sharpening) деталей.

У модулі ArcMap інструментом “+” вводять у програму растрове зображення. У робочому вікні Layers (шари відкритих у даному вікні файлів) підводять курсор до назви відкритого файла, який треба класифікувати, і правою клавішею миші викликають властивості цього файла (Properties of this Layer). Відкривається вікно Layer Properties (рис. 4.57). У меню Symbology (символіка) в підменю Show з’являються чотири способи зміни кольорів земних об’єктів на растровому зображенні (про що свідчить інформація у робочому вікні Layers). Це можуть бути космознімки у форматі .img чи інших форматах ГІС-файлів. Зіскановані зображення у растрових форматах .jpg, .tif, .png та ін. також вводять в ArcMap, проте їхня перекласифікація обмежена двома способами (Stretched і RGB Composite). Зазначимо, що класифікація передбачає лише зміну кольорів у межах каналів RGB.

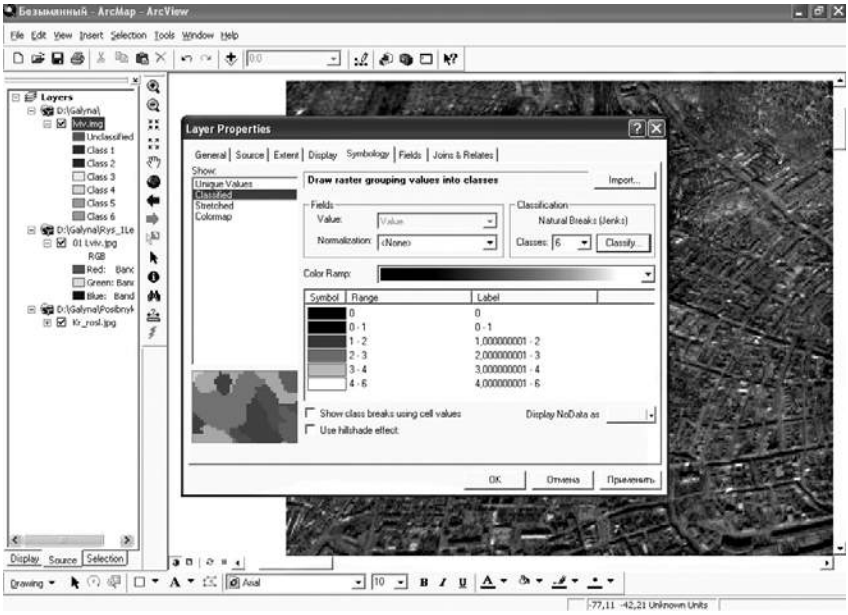
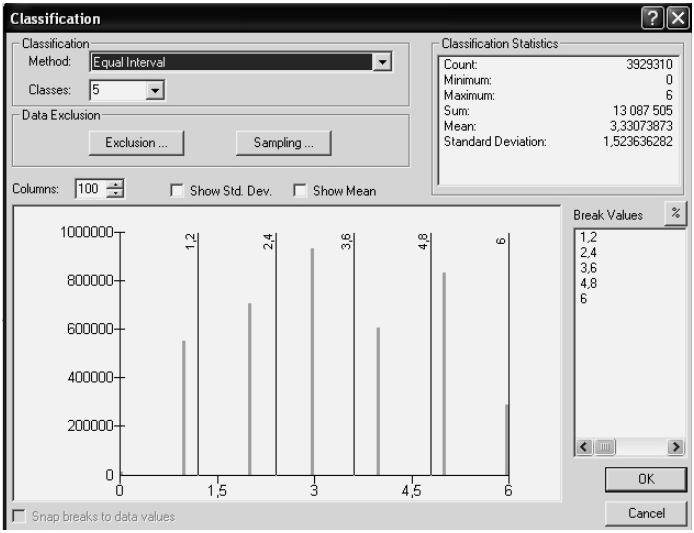



Рис. 4.57. Вікно властивостей файлу
з активним меню Symbology та його підменю.

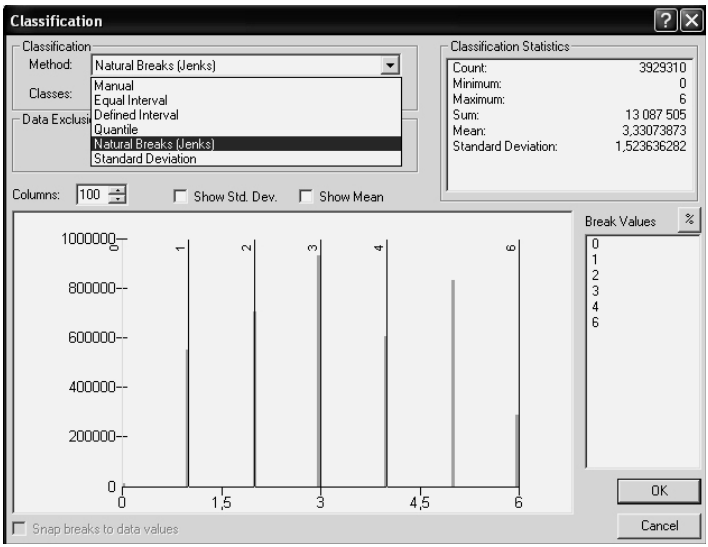
Зміну кольорів виконують такими способами: Unique Values (єдині значення), Classified, Stretched (неперервне простягання), Colormap. У разі активації кожного способу відкривається його вікно з опціями методів чи типів зміни. Способом *Unique Values* задають назви майбутніх класів та колір класу, викликаючи кольорову схему (у вікні Color Scheme) або позначаючи в комірці кольору потрібний (подвійно клацаючи на значку). Далі програма автоматично перетворює зображення згідно з виставленими параметрами.

У вікні *Classified* фіксують кількість класів для майбутньої класифікації зображення (підменю Classes), їхні кольори у вигляді неперервної гами – підменю Color Ramp (наприклад, від зеленого до коричневого, причому можна змінити колір тієї чи іншої комірки подвійним клацанням на неї) та задають власне параметри класифікації у підменю Classify. Якщо активізувати комірку Classify, відкриється додаткове вікно Classification, в якому зазначають метод задання інтервалів між класами – Manual (ручний), Equal Interval (рівний інтервал, наприклад через 1,2 значення) (рис. 4.58 *а*), Defined Interval (визначений, рівномірно поділений інтервал), Quantile (певними порціями), Natural Breaks (природна розбивка) (рис. 4.58 *б*), Standart Deviation (стандартне відхилення). Змінюючи методи та оглядаючи результати класифікації, добиваються найбільшої відповідності вихідного зображення класифікованому.

Третій спосіб зміни кольору об'єктів на знімку – це вибір у вікні Layer Properties опції *Stretched* (Простягання). Він передбачає задання неперервної смуги кольорів від темних відтінків до світлих і далі знов до темних. Типи автоматичного задання відтінків зазначені у списку підменю Type: Custom, Standard Deviations (певне відхилення), Histogram Equalize (інтервал в гістограмі), Minimum-Maximum, Histogram Specification. Якщо відтінки кольорів треба виставити доволі точно, використовують підменю Histogram. Задаючи це підменю, відкриється його діалогове вікно, у якому відображений графік розподілу кольорів на зображенні в палітрі RGB. Корегують простягання лінії графіка від ідеальної прямої до ламаної доставлянням безпосередньо на графіку додаткових точок в місцях зміни відтінків кольорів (рис. 4.59). У вікні підменю Info задають також числові значення точок зламу. Зміна лінії гістограми дає змогу розтягнути одні відтінки кольорів і змен-

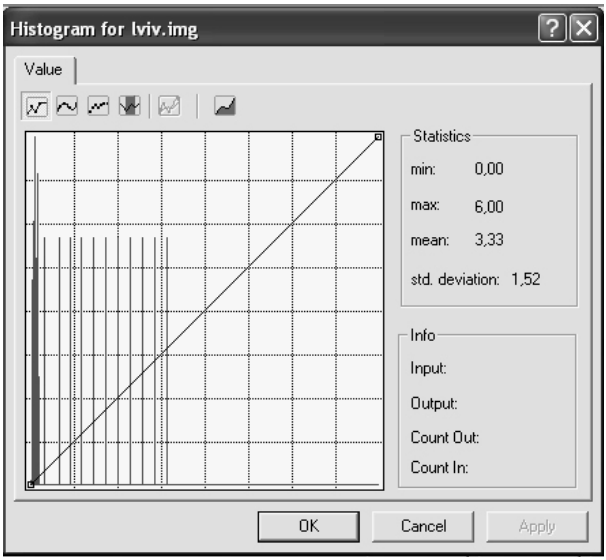



*а*

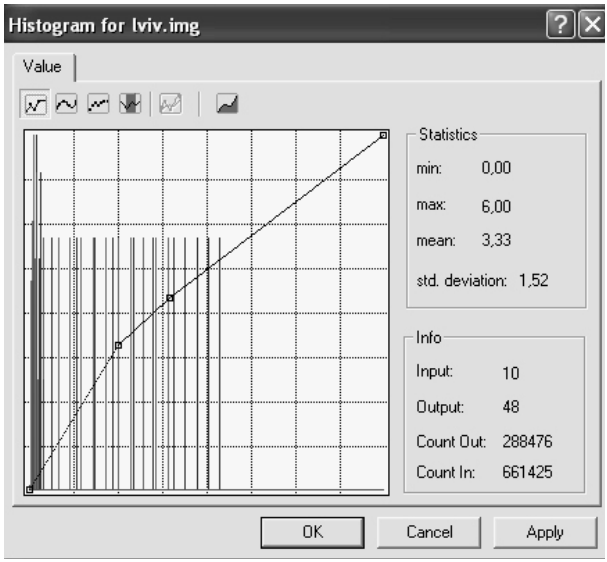



*б*

Рис. 4.58. Вікна процесу класифікації,
в яких задають інтервали між класами:
*а* – через рівні проміжки (Equal Interval ), *б* – розбиваючи природно.




*а*




*б*

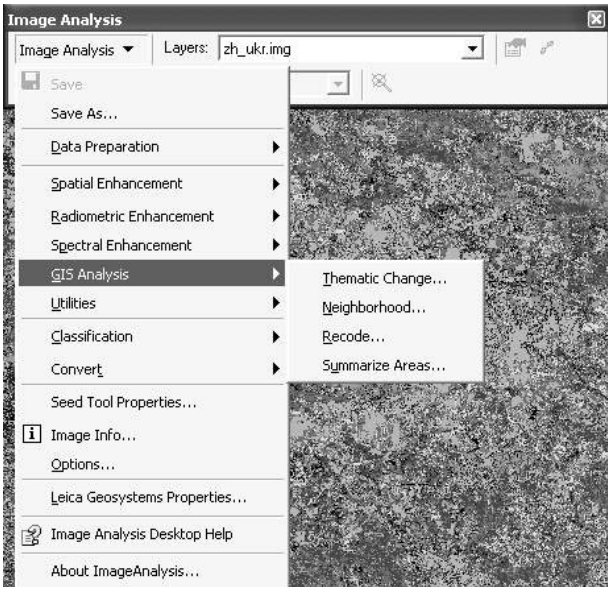
Рис. 4.59. Гістограма зміни відтінків кольорів:
*а* – заданий графік, *б* – змінений заданням додаткових точок на лінії.

шити інші або зовсім їх усунути з неперервної смуги. Тобто зміна відтінків від світлих до темних і далі до світлих залишиться, але в новій схемі можуть бути відсутні деякі відтінки чи навіть окремі кольори. Підменю Colormap у вікні Layer Properties відображає легенду представленого у вікні монітора зображення.

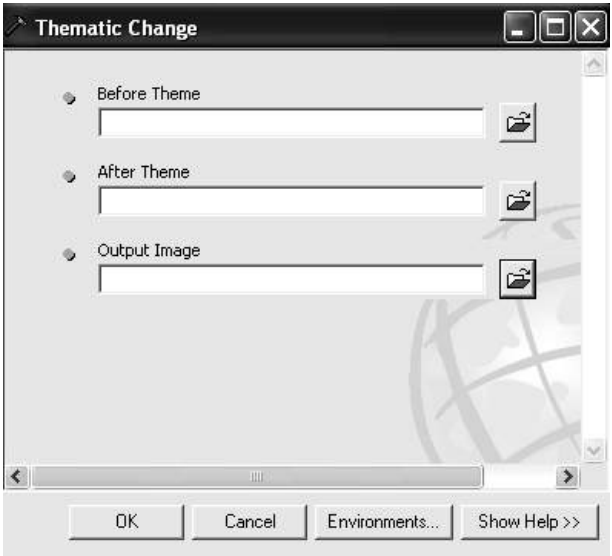
Суттєво інші можливості для роботи з космічними знімками у програмі ArcGIS версії 9.3 відкриваються з появою модуля *Image Analysis*™. Розроблений компанією "Leica Geosystems GIS & Mapping LLC" для даного програмного забезпечення, модуль містить більшість головних функцій програми Erdas Imagine. Це – "ручна" геометрична корекція: афінна, поліномінальна, "гумовий лист", перепроектування; ортокоректування зображень для цифрових космічних камер – з центральною проекцією, IKONOS, SPOT, Quickbird, Landsat; можливості складання мозаїки зображень і зміни кольорів; класифікація зображень на підставі спектральних каналів (автономна і керована); визначення нормалізованого вегетаційного індексу (NDVI); відсікання частини зображення; перетворення растру у векторні шари і растеризування векторного зображення та ін.

Усі функції компактно згруповані у вертикально розташованому меню, з якого заходять у підменю (рис. 4.60 *а*). Після вибору опції підменю відкривається додаткове вікно, у якому вибирають варіанти дій (рис. 4.60 *б*).

Функція підготовки даних (Data Preparation) передбачає створення нових файлів зображень (Create New Image), представлених як тематичними (дискретними) растрами – для якісної інформації, так і півтоновими (континуальними) – для кількісної. Підменю відсікання зображення (Subset Image) дозволяє копіювати частину оригінального зображення в новий файл. Вона затребувана, коли початковий файл набагато більший ділянки, що вивчається. Функція працює з багатошаровими півтоновими зображеннями і відсікає частини зображення по шарах. Наприклад, можна вирізати частини зображень тільки в трьох потрібних каналах знімка Landsat-TM з семи. Підменю Mosaik Image виконує об'єднання декількох просторово орієнтованих зображень в одне. Початкові зображення повинні мати інформацію про проекцію, розмір пікселів, одиниці вимірювання, але ці показники можуть розрізнятися у всіх файлів. Також підтримуються калібровані зображення.




*а*




*б*

Рис. 4.60. Меню модуля Image Analysis™ програми ArcGIS 9.3 з відкритим підменю функції GIS Analysis (*а*) та діалоговим вікном (*б*).

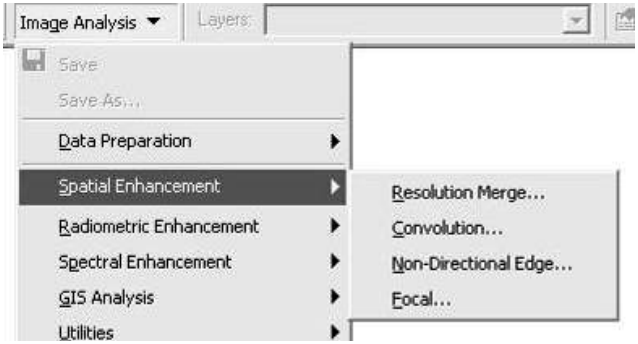



Рис. 4.61. Меню Spatial Enhancement для Image Analysis.

Для збірки мозаїки використовуються дані з однаковою кількістю шарів, як тематичні растри, так і півтонові. Підменю Reproject Image дає змогу перевести растрові дані з однієї картографічної проекції в іншу.

Низка функцій у модулі Image Analysis дає змогу виконати поліпшення якості зображень. Зокрема, функція просторового поліпшуючого перетворення (*Spatial Enhancement*) передбачає (рис. 4.61):

– фільтрацію зі згорткою,

– ізотропний фільтр виявлення країв,

– фокальну тематичну фільтрацію

– злиття знімків з різною роздільною здатністю.

Функція радіометричного поліпшуючого перетворення (*Radiometric Enhancement*) виконує такі операції:

– розтягування з використанням таблиць перекодування (LUT) (рис. 4.62),

– вирівнювання гістограм яскравості,

– поєднання гістограм,

– інверсію темних і світлих тонів (перетворення на негатив).

Функція спектрального поліпшення зображень (*Spectral Enhancement*) виконує:

– перетворення кольорової гами RGB в IHS,

– перетворення колірного простору IHS в RGB,

– трансформацію за нормалізованим вегетаційним індексом (NDVI), що дає змогу виділити пониклу рослинність,

– перетворення зображення в природні кольори.

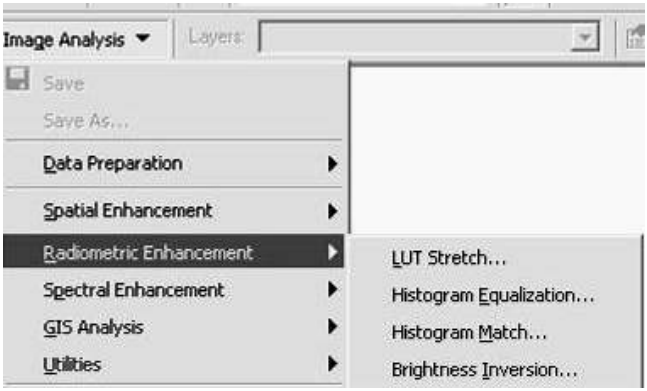



Рис. 4.62. Меню Radiometric Enhancement *для* Image Analysis.

*Для* отримання важливої ресурсної інформації використовують можливості функцій *ГІС-аналізу*. Вони охоплюють:

– аналіз околиць (сусідства) об'єктів;

– виявлення тематичних змін. Image Analysis автоматично створює тематичний растр, на якому відображені території, що піддалися зміні;

– перекодування растрів. Ця функція перераховує значення класів тематичного растру на нові. Її використовують для зменшення кількості класів, їхнього комбінування, присвоєння нових значень існуючим класам та записів назв класів і зміни кольорів в атрибутивну таблицю;

– підсумування областей. Використовують як метод оцінки змін.

В меню "Утиліти" введені такі функціональні можливості: автоматичне виявлення тимчасових змін (Image Difference), збірка багатоканальних зображень (Layer Stack) і повторне масштабування зображень (Rescale Image).

Функція "*Класифікація зображень*", як і в програмі Erdas Imagine, дає змогу виконувати одну з найбільше поширених операцій з перетворення зображень – їхню категоризацію/класифікацію. Якщо під час досліджень послуговуються еталонними ділянками з відомою інформацією про об'єкти земної поверхні, то використовують класифікацію "з навчанням" (Supervised). Класифікація "без навчання" (Unsupervised/Categorize) перед-

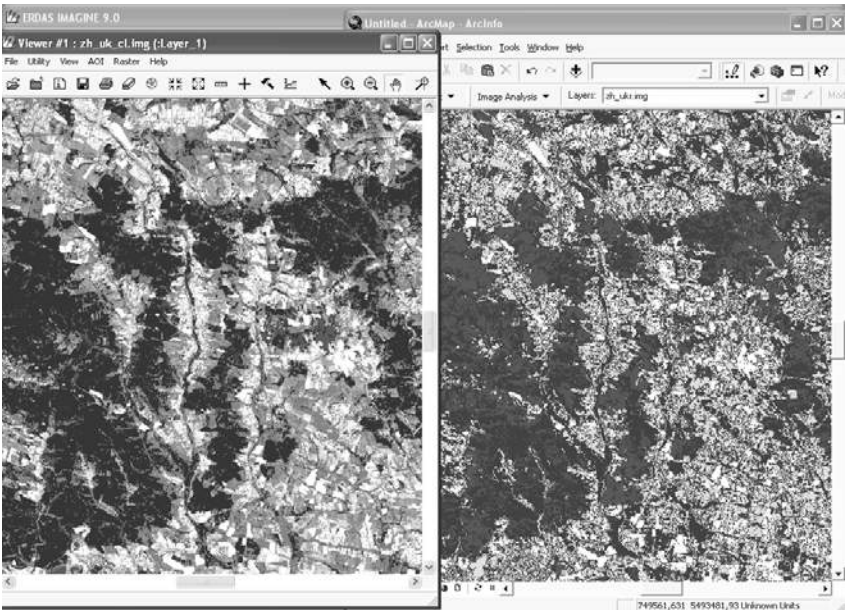



Рис. 4.63 Класифікація “без навчання” з однаковою кількістю класів в Erdas Imagine (зліва) та ArcGIS (справа).

бачає мінімальну кількість вхідних параметрів, проте інтерпретація отриманих класів тут складніша. Вона ідеальна для розбиття на категорії континуальных растрів, що несуть в собі кількісну інформацію (NDVI). В результаті класифікації зображень в наявному середовищі ArcGIS, автоматично отримують за знімком тематичні карти (наприклад, рослинних комплексів, видів природокористування тощо). Порівнюючи результати класифікацій в Image Analysis для ArcGIS та Erdas Imagine, доходимо висновку, що загальні контури виділів як в одній програмі, так і в іншій є достатньо точними (рис. 4.63). Image Analysis для ArcGIS дає більшу дрібність контурів всередині виділів, що потребує подальшого фільтрування. Кольори тут насиченіші, а можливості їхнього редагування ширші з використанням діалогового вікна Symbology. В Erdas Imagine виділи більш монолітні, що засвідчує на єдність об’єктів місцевості. У даній програмі є кращі можливості для перекласифікації неточно впізнаних об’єктів місцевості.

Функція перетворення “Convert” (растр-вектор, вектор-растр) в Image Analysis для ArcGIS дозволяє перетворювати шейп-файл в растровий формат і навпаки. Вона використовується, коли потрібно ізолювати або “підсвітити” частину растрового зображення, або коли шейп-файл необхідно представити у вигляді растру.

Таким чином, в умовах масового використання дистанційних матеріалів для картографування, коли наявні паперові носії є застарілими і неактуальними, а цифрові карти малодоступні, рядові користувачі ГІС можуть ефективно послуговуватися дистанційними даними в ArcGIS без придбання спеціального пакету Erdas Imagine. Покращення якості зображень впливає на точність інтерпретації, а автоматичний аналіз растрових зображень дає змогу отримати нові дані щодо закономірностей поширення об’єктів місцевості.

# Розділ 5

# ГЕОГРАФІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ АЕРОКОСМІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

## 5.1. Інтерпретація метеорологічних характеристик

Мабуть, метеорологічні оцінки, прогноз погоди серед щоденної інформації належать до найбільш вживаних, потрібних і важливих для життя людей. З огляду на те, що погода формується на великих територіях, вона зумовлена складними процесами фізичної взаємодії між мінливим в просторі і часі приходом сонячної енергії, повітряними масами різних властивостей, вихровими ламінарними та турбулентними повітряними адвективними та конвективними потоками. Кожна людина, зокрема, спостерігаючи за ходом лише місцевих метеорологічних явищ та пов'язаних з ними подій природного середовища не може впевнено прогнозувати майбутній розвиток погоди. Більше того – вся мережа метеорологічних постів, станцій, обсерваторій, центрів опрацювання метеорологічної інформації, що має "стаж" роботи вже 100–150 років, не могла ще донедавна повною мірою задовольнити синоптичні потреби людей. Лише з появою космічних методів здобуття метеорологічної інформації прогнози погоди стали близькими до реальних й укріпили в людей довіру до прогресу науки, техніки і стали одним з аргументів до оправдання значних затрат коштів та засобів людства на розвиток космічних технологій.

Метеорологічні процеси швидкоплинно змінюються в просторі та в часі, а тому потребують постійного стеження за ними, щоб мати змогу забезпечити потреби навігації транспорту, промисловості, сільського господарства, рекреаційного господарства та побуту населення. Для цього потрібні експрес-методи швидкісного збору метеорологічної інформації та її аналізу. Космічні методи та сучасні засоби опрацювання інформації вже значно цьому сприяють. Однак метеорологія, як і всі науки, пов'язані з геопростором, відчувають суттєвий дефіцит потрібної інформації для конкретних регіонів у реальному часі. Тому космічні методи в метеорології розвиваються, вдосконалюючи можливість вирішення усталених, а також нових потреб.

Сьогодні за допомогою космічних методів можна отримувати таку метеорологічну інформацію:

- поширення хмар та їхні форми;
- структура хмарності;
- розташування й рух атмосферних фронтів;
- оцінка характеру та напрямків переміщення циклонів;
- визначення регіонів поширення, кількості та інтенсивності опадів;
- визначення градоносності хмар;
- виявлення та оцінка гроз;
- забрудненість атмосфери;
- напрямки повітряних струмінних течій;
- вертикальний градієнт температури в атмосфері;
- вертикальний профіль вологості в атмосфері;
- градієнт температури у приповерхневій товщі води;
- температура діяльної поверхні суші та водних поверхонь;
- поширення і деякі фізичні характеристики снігового та льодового покривів;
- поширення та інтенсивність пилових бур, мли, димових факелів;
- температурний профіль ґрунту;
- визначення запасів продуктивної вологи в ґрунті.

Цей неповний перелік показує, що головні метеорологічні характеристики можна визначати дистанційними методами. Вони

стосуються параметрів повітряного шару та діяльної поверхні[1]. Водночас це стало причиною значного скорочення кількості наземних метеорологічних та аерологічних станцій, що дещо зекономило кошти для космічних метеорологічних досліджень, але і погіршило умови верифікації космоданих.

Нині у світі працюють державні мережі наземних метеорологічних станцій за традиційними і стандартними методиками, а також державні та міждержавні супутникові системи спеціального метеорологічного призначення. Така паралельність роботи наземних та супутникових систем позитивно впливає на точність результатів досліджень, виявлення відхилень у визначених параметрах і на відповідну корекцію методик їхнього визначення, на уточнення розрахункових формул, моделей діагностики і прогностики метеорологічних процесів та явищ, поліпшення методів просторового моделювання та картографування метеорологічних характеристик.

### *5.1.1. З історії космічних метеорологічних досліджень*

Перші системи метеорологічних супутників створили Сполучені Штати Америки та Радянський Союз. Серед піонерних країн, що запустили окремі метеорологічні супутники, були також Франція, Японія, Італія.

Перші метеорологічні вимірювання були виконані третім радянським ШСЗ, запущеним у 1958 р. Він вимірював щільність верхніх шарів атмосфери. З 1962 р. регулярно запускали ШСЗ серії "Космос", споряджені різною апаратурою. Апарат "Космос-122", запущений в 1966 р. випробовував прилади, призначені для вивчення хмарності, снігового та льодового покривів, а також потоку власного випромінювання системи Земля-атмосфера. Метеорологічне призначення мали супутники "Космос-144" та "Космос-156" (1967 р. запуску), які

---

[1] *Діяльна поверхня* – наземна поверхня (відкритий ґрунт, гірські породи та всі поверхневі мінеральні та водні поверхні разом з рослинним покривом), що взаємодіє із сонячними та іншими променями, які до неї доходять і сама стає джерелом тепла, ЕМХ та причиною трансформацій (теплових, динамічних, інгредієнтних та ін. в приземній верстві повітря). С. Рудницький вживав для означення цього явища термін "підсоння", вдало наголошуючи на найважливішій ролі Сонця як джерела енергії на Землі.

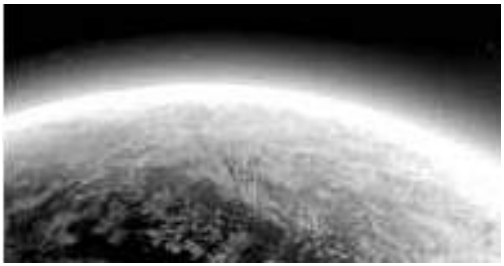


Рис. 5.1. Світанок над Землею. Видно світіння атмосфери – яскраве при Землі і з поступовим зменшенням світіння у верхніх розріджених шарах.

започаткували радянську космічну метеорологічну систему “Метеор”, продовжену запусками супутників нової серії “Метеор” з 1969 р. Перші знімки Землі з високих орбіт дали змогу побачити потужність земної атмосфери, яка на горизонті проявлялася світінням (рис. 5.1).

Перші досліди з дистанційних метеорологічних досліджень були розпочаті в США ще в 1959 р.: на супутнику “Авангард-2” був здійснений перший експеримент з дослідження планетарного розподілу хмарності. На супутнику “Експлорер-7”, запущеному в 1959 р., була вже встановлена апаратура для вимірювання довгохвильового випромінювання системи Земля–атмосфера. Протягом 1960–1965 рр. США запустили десять удосконалених варіантів супутника “Тайрос”, чим створили космічну метеорологічну систему, яка надалі доповнювалася новими супутниками серій “ЕССА”, “НОАА”, “ІТОС”, “Німбус”.

На супутнику “Німбус-5” вже встановлено апаратуру для отримання метеоданих: радіометри для визначення температурного профілю атмосфери в шарі до 64 км, спектрометри для визначення вмісту водяної пари й озону в атмосфері, спектрометр для визначення температури поверхні Землі, телекамера для отримання її безперервного зображення в денний час, спектрометр для визначення вмісту водяної пари в атмосфері, що доповнювались системами навігації та радіозв’язку.

### *5.1.2. Метеорологічні супутники*

Метеорологічні супутники – це спеціальні комплекси, лабораторії, що обладнані складною електронною апаратурою для спостереження, вимірювання, запам’ятовування метеорологічних параметрів та їхньої передачі на Землю. Такий супутник може за короткий час отримати інформацію про погодні характеристики на всій Землі. Враховуючи,

що час здійснення одного оберту навколо Землі метеорологічний супутник здійснює приблизно за півтори години, то легко порахувати, що за добу він облетить нашу планету приблизно 16 разів:

24 год × 60 хв : 90 хв = 16 раз

У цьому разі підсупутникова лінія проекцій візирної осі апаратури, спрямованої в надир на Землю, буде з кожним обертом зміщуватися на 22,5° (360° : 16 = 22,5°).

Тобто, якщо знімальна апаратура має такий кут огляду, що в нього вписується смуга шириною ≥ 22,5° географічної довготи, то за одну добу можна зазняти всю поверхню Землі з такої невеликої висоти, що дає змогу детально вивчати структуру та властивості хмар і наземних покривів.

За умови, що супутники літатимуть на вищих орбітах, швидкість охоплення зніманням усієї земної кулі одним супутником скорочується до кількох годин. Однак і цей термін надто великий для вивчення динамічних процесів в атмосфері, а тому мають існувати можливості отримувати інформацію про стан нижніх шарів атмосфери у будь-який потрібний момент. Таку потребу задовольняють супутники, запущені на дуже високі орбіти, з яких можна бачити відразу цілу півкулю Землі і постійно "висіти" над нею, стежити за змінами. Такими є геостаціонарні орбіти, на яких кутова швидкість руху супутника збігається з кутовою швидкістю обертання Землі навколо своєї осі. Для зондування приполярних областей Землі, які часто виконують роль "кухні" погоди, потрібні супутники, запущені на полярну орбіту. Для зондування приекваторіальних частин земної кулі, де розвиваються інтенсивні та швидкомінливі метеорологічні процеси (тропічні тайфуни), потрібні супутники на субекваторіальних орбітах. Для стеження за формуванням і розвитком атмосферних вихорів (циклонів) помірних широт потрібні супутники на "нахилених" орбітах. Ще однією умовою, яку часто використовують у метеорологічній інтерпретації результатів знімання, є однакові умови освітлення, що потребує використання сонячно-синхронних орбіт, коли супутник точно повторяє свою траєкторію через певне число обертів і періодично появляється над географічними об'єктами в один час доби при майже однаковому куті падіння сонячних променів.

Крім зазначених особливостей закладення орбіт потрібно так визначити час запуску супутників, щоб вони могли давати

інформацію, рівномірно розподілену в часі, а моменти їхнього пролітання над територією держави власника супутника збігалися, здебільшого, з денним часом та термінами виконання спостережень на наземних метеорологічних станціях.

Отже, для задоволення потреб метеорології потрібні різні засоби і методи, які можуть задовольнити космічні апарати спеціального призначення, запущені на різні за висотою орбіти з різними орієнтаціями їхніх траєкторій, періодами обертання, різним охопленням території і детальністю знімання, з різною апаратурою, що дасть змогу отримувати специфічну інформацію про властивості приземного шару повітря та діяльного шару Землі (підсоння). Тобто, *потрібна ціла система метеорологічних супутників.*

Більшість метеорологічних супутників літають на орбітах з висотою 600–900 км над Землею. З цієї висоти один кадр знімання охоплює достатньо велику територію – сотні і тисячі лінійних кілометрів в межах одного кадру (розмір території залежить від кута огляду знімальної апаратури) з достатньою детальністю для вивчення поширення та структури хмарного шару в тропосфері.

*До метеорологічних супутників ставлять певні вимоги*:

- Супутник повинен бути постійно орієнтований знімальною апаратурою на Землю.
- Мати стабільне положення в триосній системі, тобто супутник не повинен обертатися навколо будь-якої з осей (впорядковано чи без порядку крутитися, вібрувати, перекидатися) стосовно лінії орбіти. Для задоволення цих умов супутник повинен бути споряджений апаратурою безперервної дії, що забезпечує постійний контроль його орієнтації та мікродвигуни[2] для корекції позиції супутника на орбіті.

---

[2] Замість двигунів корекції як активного способу стабілізації можуть застосовуватися і пасивні способи: штучно видовжена й ексцентрична за масою конструкція супутника, в якій орієнтація забезпечується різницею гравітаційної дії Землі, а саме гравітаційного градієнта поміж доземною (важкою) і відземною (легкою виносною штангою) частинами супутника на орієнтацію супутника: приблизно так, як це відбувається у ляльок типу "Ванька-встанька". Інші системи стабілізації можуть використовувати гіроскопи або аеродинамічні площини.

- Не менш важливою умовою роботи метеорологічних супутників є підтримання постійної температури всередині супутника, від чого залежить точність роботи вимірювальної апаратури.
- Крім того, на супутнику повинна бути система забезпечення апаратури стабільним електричним живленням.
- Необхідною умовою роботи метеосупутника є невідкладність і швидкість передачі на Землю зібраної інформації, тобто система радіопередачі нагромадженої інформації на "свої" наземні пункти космічного зв'язку, або передачі її вже в момент збору (знімання, вимірювання). У разі дотримання всіх цих вимог метеорологічні супутники повинні бути невеликими і легкими, що дасть змогу виводити їх на високі орбіти.

Основою отримання метеорологічної інформації є реєстрація інтенсивності ЕМХ у відповідних ділянках хвильового спектру, випромінених або відбитих системою Земля–атмосфера. Найактивнішою в цій системі є географічна оболонка та фокусний прошарок взаємодій в ній – ландшафтна оболонка.

Виділяємо два *головні види інформації,* яку реєструють метеорологічні супутники:

- Оглядова, що дає зображення просторової різноманітності спостережуваних явищ (наприклад хмар).
- Кількісна – як цифровий результат замірів інтенсивності певних потоків ЕМХ.

Для отримання *першого виду інформації (оглядової)* використовують апаратуру, що працює в зоровому (видимому) та в оптичній частині інфрачервоного діапазону ЕМХ. У зазначених діапазонах працює більшість апаратів дистанційного зондування землі, а саме – фотографічні (усіх типів), телевізійні кадрові та сканерні, в тому числі інтегральні, спектрозональні та багатозональні апарати. Ці системи виконують знімання Землі з прилеглими шарами атмосфери переважно на денній і з деякими обмеженнями (звуженням до оптичної частини інфрачервоного діапазону) – на нічній стороні Землі. Інформацію отримують як просторове зображення на фотографічних матеріалах чи на екранах моніторів, комп'ютерів, телевізорів та інших засобів візуалізації зображень. Їх сприймають очима як картинку, оглядають, аналізують, через що й називають оглядовою. Інформація, яку несуть просторові зображення, може також бути піддана спеціальному комп'ютерному (чи графічному

настільному) опрацюванню з виконанням вимірювань та аналізом отриманих кількісних даних.

*Другий вид інформації (кількісна)* отримують за допомогою вимірювальної актинометричної та радіометричної апаратури. Таким способом вимірюють інтенсивність відбитого чи власного випромінювання Землі, що несе інформацію про радіаційні, теплобалансові, воднобалансові та інші параметри радіаційно-активного шару (РАШ). Ці прилади, здебільшого радіометри, які працюють в інфрачервоному позаоптичному та надвисокочастотному діапазонах ЕМХ, реєструють непросторові картинки, а графік інтенсивності випромінювання в певному діапазоні. Використовуючи реєстрацію селективованих ділянок спектра ЕМХ, можна інтерпретувати показники прогріву поверхневого шару Землі (її РАШу), показники вологості ґрунту, запасів води. Синхронні спектральні зондування дають змогу оцінювати також вертикальні профілі температури та вологості повітря.

### *5.1.3. Знімальна апаратура метеорологічних супутників*

Загалом, знімальна апаратура метеорологічних супутників принципово не відрізняється від знімальної апаратури загального призначення, особливо для оглядової інформації, однак може мати свою специфіку.

Телевізійна апаратура метеорологічного супутника підбирається з такими параметрами, щоб отримані знімки давали змогу інтерпретувати форму і кількість хмар на площах, які своїми розмірами дорівнюють чи перевищують території формування синоптичних об'єктів: циклонів, антициклонів, атмосферних фронтів та ін.

За використанням довжин хвиль ця апаратура може бути інтегральною, спектрозональною чи багатозональною.

Апаратурою, що працює в *інфрачервоному діапазоні*, знімають в денний і нічний час, використовуючи вікна прозорості атмосфери, а найчастіше – вікно 8,0–12,0 мкм. Цей інтервал ЕМХ широко застосовують супутники серії "Космос", "Метеор", НОАА, Лендсат та ін. У зазначеному вікні прозорості реєструють теплове випромінювання, що йде від хмар та від РАШ поверхні Землі і формується залежно від температури цих поверхонь. Відбита сонячна (світлова) радіація майже не впливає на рівень випромінювання

Землі в даному діапазоні. Крім того, саме в зазначеному діапазоні йде найінтенсивніший потік власного випромінювання Землі. Завдання вимірювання випромінювання Землі вирішують шляхом порівняння цього випромінювання з випромінюванням Космосу. У разі реєстрації рівня та амплітуди випромінювання поміж наземними чи атмосферними об'єктами можуть бути визначені температури цих об'єктів та різниці їхньої температури. За умови картографічного оформлення результатів дистанційних температурних вимірювань можна створювати карти прогрітості Землі.

Крім вікна прозорості в інфрачервоному діапазоні спектра ЕМХ, на метеорологічних супутниках встановлюють також апаратуру, що використовує вікна прозорості атмосфери та *реєструє хвилі світлового діапазону, а саме 0,3–0,7 та ближнього інфрачервоного – 0,7–3,0.* На ці діапазони припадає основна частина відбитого сонячного випромінювання наземних та приземних об'єктів. Саме в цьому діапазоні добре проявляється світлова та "інфрачервона" яскравість наземних та атмосферних об'єктів. Відповідна апаратура може давати змогу отримувати оглядові зображення (знімки), або кількісні показники інтенсивності випромінювання.

На метеорологічних супутниках ставлять також багатоканальну сканувальну апаратуру – три, п'ять, сім і більше каналів. Вибір каналів залежить від потреби вирішувати певні види завдань.

За наявності на супутнику радіометра, що працює в діапазоні 6,5–7,0 мкм, який збігається зі смугою поглинання атмосферою випромінювання (такі фізичні властивості водяної пари, що є в атмосфері), можна визначити степінь такого поглинання, а отже, й кількість водяної пари в повітрі (за умови відсутності хмар на шляху променів[3]). Еталоном для порівняння зареєстрованого випромінювання є стале випромінювання сонячного диска.

За наявності на супутнику радіометра, що працює в діапазоні 10–11 мкм, можна отримати дані про розподіл хмар в тропосфері, температуру верхньої границі хмар, її висоту, температуру земної поверхні, а також визначити горизонтальні градієнти температури при безхмарній погоді.

---

[3] За наявності хмар можна отримати оцінку вмісту вологи в тій частині атмосфери, що є над хмарами. Хмари дуже ослабляють потік хвиль у зазначеному світловому діапазоні.

Вимірювання випромінювання в хвилях 14–16 мкм, яке збігається зі смугою поглинання ЕМХ вуглекислим газом, дає змогу визначити вміст цього газу в тропосфері і водночас розрахувати температуру нижньої частини стратосфери.

Реєстрація випромінювання ЕМХ довжиною 20–30 мкм дає змогу отримати інформацію про відносну вологість у нижніх шарах атмосфери та про структуру "полів" вологості.

Залежно від потрібної точності підбирається радіометр з тим чи іншим кутом огляду – чим вужчий кут огляду, тим меншими будуть піксели сканування, тобто елементарні частинки формування зображення – від сантиметрів до десятків кілометрів.

У разі синхронного використання апаратури, що реєструє випромінювання в світловому, тепловому та в радіодіапазонах, є можливим визначення характеристик теплового балансу, тобто визначення статей приходу тепла на Землю і витрат тепла земною поверхнею.

### *5.1.4. Метеорологічне дешифрування*

*Метеорологічним дешифруванням називають* процес розпізнавання метеорологічних об'єктів та кількісної оцінки їхніх характеристик. Успішність такого дешифрування залежить від характеру дистанційної інформації, її комплексності, точності та взаємної пов'язаності, наявності допоміжної апаратури, а також від спеціальної (метеорологічної, синоптичної геофізичної та географічної) підготовки дешифрувальника.

Під час метеорологічного дешифрування, як і в разі інших спеціалізованих дешифрувань, використовують дешифрувальні ознаки. Головними з них є фототон (яскравість) та структура (рисунок) зображення.

Фототон (світловий тон) зображення – це сприйнята неозброєним оком яскравість окремих елементів зображення. Він залежить від відбивних властивостей наземних об'єктів та від співвідношення кутів відбиття променів та кута падіння візирної лінії. Отже, за різного розташування (позицій) космічного апарата, Сонця та об'єкта знімання яскравість одних і тих самих об'єктів може сильно змінюватися. Зображення хмар формується фототонами, що залежать від структури та складу хмари, характеру її розвитку та специфікою поверхні хмари (рис. 5.2). Через це під час де-

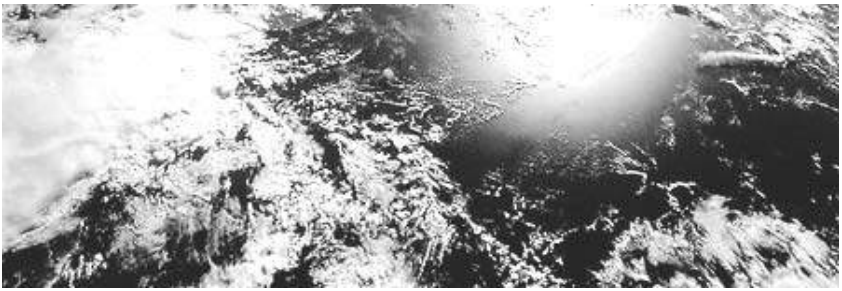


Рис. 5.2. Оглядовий знімок хмар в регіоні з переходом від щільної хмарності до розрідженої та безхмарного простору. Видно сонячний відблиск від поверхні океану.

шифрування хмар використовують не кількісну оцінку яскравості (фототонів) хмар, а відносні порівняльні показники яскравості елементів хмарності.

На телевізійних знімках розрізняють 5–7 градацій відносної яскравості. Найсвітліші ділянки знімків характерні для хмар вертикального розвитку, що мають значну висоту і щільність. Менш світлі ділянки зображень характерні для хмар середньої вертикальної потужності. Світло-сірі плями належать хмарам тонким, переважно перистим. Такий самий відтінок можуть мати піски пустель чи узбереж, льодові та снігові покриви. Сірі та темно-сірі плями на знімках видно поміж хмарами і сушею, з рослинністю чи без неї, але і без снігу. Темнішими плямами відображаються ліси, особливо хвойні. Найтемніший фототон властивий поверхням водозбірників, особливо чистих та глибоких.

Під час дешифрування знімків, зроблених в інфрачервоному діапазоні ЕМХ, варто пам'ятати, що яскравість зображення об'єктів на них залежить не від їхнього альбедо, а від їхньої температури. З огляду на те, що температура хмар залежить від температури навколишнього повітря, яке також змінює свою температуру відповідно до вертикального температурного градієнта, за наявності даних температури для поверхні Землі за фототонами можна приблизно визначити і температуру хмари у різних її висотних частинах і висоту хмари.

Під час дешифрування хмар важливо визначити *контрастність яскравості* елементів зображення. Контрастність вважа-

ють більшою під час зменшення кількості перехідних фототонів: від білого до чорного. Зображення високої контрастності мають збіднену інформативність через втрату півтонів яскравості. Варто пам'ятати, що контрастність зображень залежить від природи території, яка зображена на знімках, однак значною мірою контрастність модифікується знімальною апаратурою, її здатністю відтворювати півтони. Фотоапарати є найкращими. Також контрастність зображень може змінюватися разом зі зміною умов освітленості об'єктів (при певних позиціях Сонця та експозиціях схилів) та прозорістю атмосфери. Зазначені зауваження, які роблять яскравість і багатство фототонів нестійкими ознаками, важливою є "композиція фототонів", яка власне і формує "картинку", структуру, рисунок, суть зображення.

Власне ця композиція фототонів є важливою ознакою під час метеорологічного дешифрування, яку називають "структура зображення", "текстура зображення" та "рисунок зображення". Зазначені терміни в спеціальній літературі мають неоднакове трактування, часто синонімічне, або й взаємно замінне.

*Структуру зображення* формують наявні та виявлені елементи зображення з властивими їм параметрами фотояскравості, розмірами, формами, взаємним розташуванням. Наприклад, з крупними, дрібними чи середньої розмірності елементами, які можуть бути округлими, витягнутими, з певною орієнтацією чи без неї, з геометричними аналогіями (круглі, овальні, еліпсоподібні, прямокутники, трапеції), плямистими (плями довільної форми), рівномірно розташованими чи скупченими, або утворювати аморфний фототон без виразних елементів, тобто без означеної структури. Розрізняють макро-, мезо-, та мікроструктуру зображення, що характеризують розмірність, масштаби хмарних систем.

*Рисунком зображення* називають специфіку розташування елементів зображення. Означають рисунок за відомими аналогіями. Наприклад: лінійне, дендритове, перисте, концентричне, радіальне, віялоподібне, плоскошарувате, купчасте, регулярно-лінійне, нерегулярно-лінійне, бордюрне, вихрове, струмінчасте, плямисте коцентроване чи дисперсне.

*Текстурою зображення* називають найтонші помітні складові зображення, що властиві для більшості основних елементів структури. Виділяють такі види текстури: матову (туманну), волокнис-

ту, нитчасту, крапчасту, зернисту, решітчасту. Матова текстура властива для однорідних поверхонь чи утворень, наприклад, для великих водних поверхонь чи для шаруватих хмар. Волокниста текстура характерна для перистих хмар. Виділяють також куполоподібну текстуру, що характерна для полів хмар вертикального розвитку.

***Дешифрування хмарності***

Змогу дешифрування хмар на знімках визначають за роздільною здатністю апаратури та носіїв знятої інформації. Очевидно, що чим менша величина елементарної частинки (пікселя), що формує зображення, тим більше деталей зображення можна розрізнити. Метеорологічні супутники літають на значних відстанях від Землі, а тому в один піксель знімка потрапляє така територія поверхні землі чи неба, яка може бути набагато більшою від реальних наземних чи небесних структурних і текстурних формацій. З огляду на це дрібні хмарки на знімках можуть окремо не зобразитись, а сформувати якусь туманоподібну пляму, якщо їх багато, або й зникнути з зображення взагалі. Однак важливою особливістю знімків з метеорологічних супутників є не детальність зображення хмар, а виявлення особливостей їхнього просторового горизонтального та вертикального розподілів, ідентифікація рисунка розташування хмарних скупчень, що дає змогу визначити за цим показником атмосферні фронти, атмосферні вихори, струменеві переміщення атмосферних мас та геофізичні процеси в тропосфері (рис. 5.3).

Розрізняють мікро-, мезо-, та макроструктуру хмарності.

*Мікроструктуру* зображення хмарності використовують для розпізнавання класів (видів) форм хмар, а за ними – розуміння і трактування характеру геофізичних процесів, які приводять до формування тих чи інших класів хмар.

*Мезоструктура* зображення хмарності стосується хмарних покривів середньої розмірності, виявляється за орієнтацією окремих хмар та їхніх скупчень, які пов'язані з розподілом повітряних потоків чи стратифікацією і термодинамікою атмосфери. Це важливі синоптичні явища, а тому на виявленні мезоструктурних утворень варто наголосити. Розрізняють смугасту, коміркову, спіральну (рис. 5.4), концентричну, спорадично нерівномірну, геометрично невизначену мезоструктури.

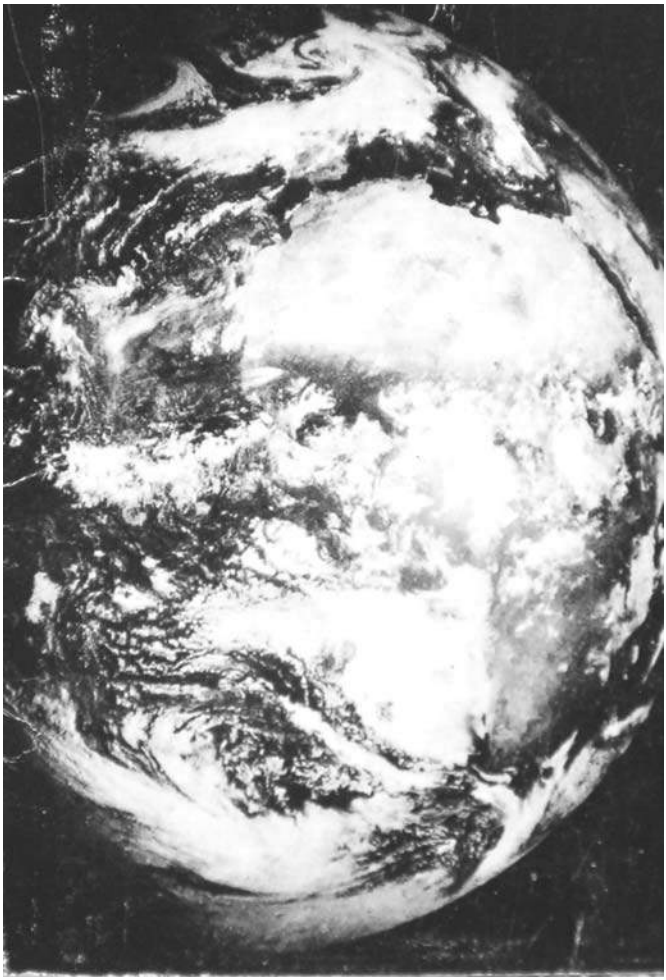


Рис. 5.3. Зображення денної сторони Землі з хмарами над Атлантичним океаном та Африкою з автоматичної космічної станції Зонд-3 1969 р. з висоти 78 тис. км. Добре видно екваторіальну смугу хмар в зоні горизонтальної конвергенції пасатів та вертикальної конвекції. Над Сахарою в зоні високого тиску тропічних широт хмар майже немає. У помірних широтах північної півкулі над Атлантикою і Європою видно спіралі циклонів. На схід від них – широка зона хмар теплої повітряної маси (теплого фронту). Над південною частиною Атлантичного океану і над течією Західних Вітрів видно потужні формації хмар, сформованих західними вітрами, що характерні для зазначеної акваторії.

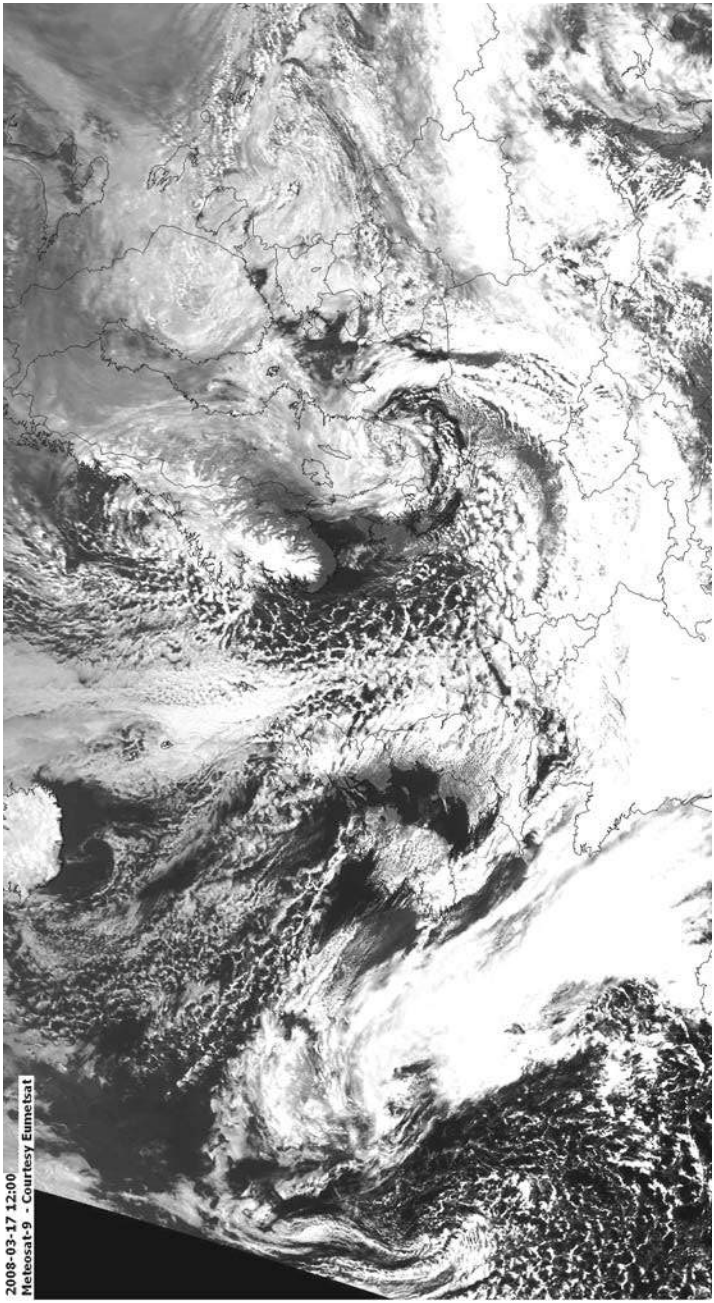



Рис. 5.4. Велика циклональна спіраль з центром над Балтійським морем.

*Макроструктура* зображення хмарності стосується великих хмарних систем, що за розміром збігаються зі системами синоптичного масштабу, що простягаються на сотні і тисячі кілометрів (див. рис. 5.3). Це області, охоплені циклонами та антициклонами, області приекваторіальних конвергенцій, тропічних тайфунів чи мусонів. У межах макроструктурних формацій хмар можна розрізняти мезо- та мікроструктурні частини зображень, які дають змогу виявляти і трактувати процеси, що проходять у товщі хмар, яка сягає іноді 5–10 км. Зокрема, наявність окремих яскравих й округлих моно-, чи полікупольних вершин, що піднімаються над аморфною (туманоподібною) пеленою шаруватих хмар, свідчить про наявність активних конвективних та турбулентних процесів у приземному шарі повітря над якоюсь територією.

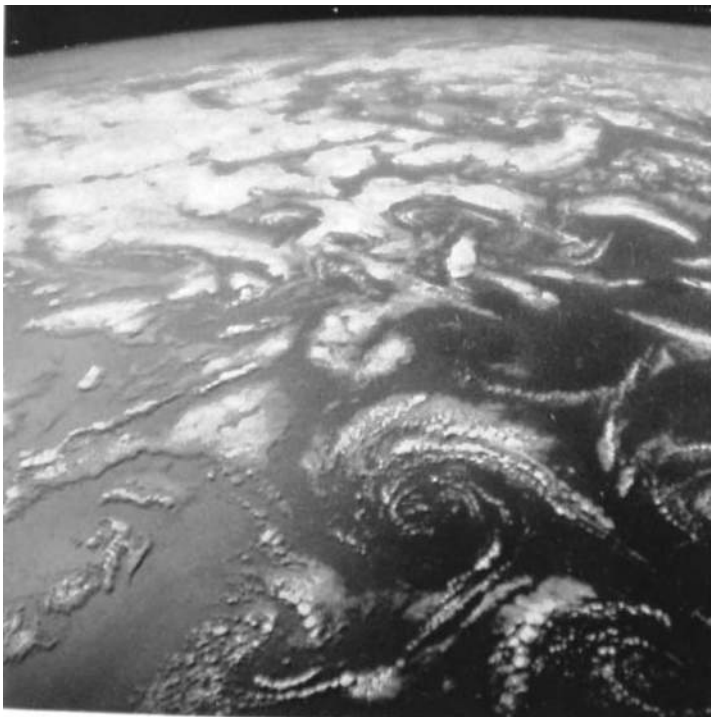


Рис. 5.5. Оригінальні дугові та спіральні формації хмар над океаном з малим проективним покриттям. Зафіксовані орбітальною пілотованою станцією Салют-3 в 1974 р. з висоти 265 км.

Наголосимо, що певні структурні формації можуть мати конкретну територіальну прив'язаність, бо залежать від специфіки ландшафтів та геофізичних процесів, що для них характерні. Такою є специфічна "орографічна хмарність", яка може простежуватись над гірськими системами чи окремими гірськими хребтами.

*Кількість хмар* можна оцінювати відсотком території та акваторії в межах знімка, яка закрита хмарами (рис. 5.5). При цьому треба пам'ятати, що іноді плями хмар за їхньою яскравістю важко відрізнити від територій, покритих снігом чи льодом, а тому слід застосовувати під час дешифрування хмар не тільки показники яскравості, а й непрямі дешифрувальні ознаки природних закономірностей, логічні зв'язки, знання типів хмар, знання специфіки їхнього поширення, розуміння формування границь певних полів хмарності. У межах простору, зайнятого хмарністю, можуть виділятися кілька полів хмар різної природи, розташованих на одній чи різних висотах. Для їхнього аналізу проводять границі (контури) систем хмар певної природи, для чого потрібна не тільки проста спостережливість та увага дешифрувальника, а й спеціальна підготовка з метеорології, фізики атмосфери, кліматології, синоптики.

*Перисті хмари (Ci)* належать до високого ярусу. Вони завжди тонкі і напівпрозорі, а тому через них "просвічують" наземні об'єкти та хмари, що розташовані нижче. Вони можуть бути розпізнані за волокнистою текстурою.

*Перисто-купчасті хмари (Cc)* також належать до високого ярусу. Через них може бути видна поверхня Землі та хмари нижніх ярусів, але їх важко відрізнити від висококупчастих, через що потрібно враховувати висоту польоту супутника, фокусну віддаль об'єктива та масштаб зображення.

*Перисто-шаруваті хмари (Cs)* зображаються як майже однорідна пляма великих розмірів, через яку слабо проглядаються об'єкти, що розташовані нижче. Їхній фототон може бути від яскраво-білого до світло-сірого.

*Високо-шарувті (As), шаруваті(St) та шарувато-дощові хмари(Ns)* мають спільну дешифрувальну ознаку – однорідний фототон. Іноді простежується невиразна смугастість. Для цих хмар характерні також великі горизонтальні розміри (до кількох тисяч кілометрів). Вертикальна потужність цих хмар також велика і просторово мінлива – від 0,3 до 5–6 км. Поступове наростання потужності

шаруватих хмар (від перисто-шаруватих, високошаруватих, до шаруватих та шарувато-дощових) індикує наступання теплої маси повітря на холодну і проходження теплого фронту.

*Високо-купчасті хмари (Ac)* вирізняються зернистою текстурою та деякою строкатістю яскравості: їхній тон зображення може змінюватися від яскраво-білого до світло-сірого. Для цих хмар характерні такі мезоструктурні утворення як паралельні ланцюжки, смуги, окремі плямки, спорадичні розсіви плям (рис. 5.6).

*Купчасті хмари нижнього ярусу (Cu)* відрізняються від інших купчастих хмар великими розмірами, зі значними різницями фотонів (від білого на вершинах куполів, складених з льодяних

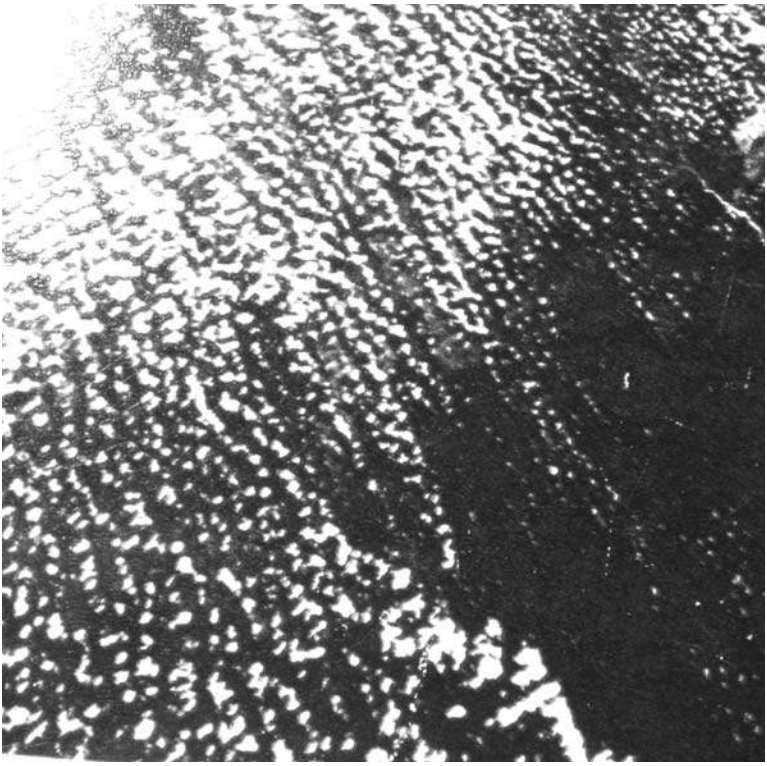


Рис. 5.6. Висококупчасті хмари вилаштувалися в тисячокілометрові ланцюги вздовж напрямку вітру. Знімок з висоти 270 км зроблений на станції Салют-3 в 1974 р. Це хмари стійкої погоди.

кристаликів, до темно-сірого у густій і водянистій нижній частині хмари) в межах зображення кожної хмари, через що ці різниці спостерігають на малих віддалях і вони часто чергуються. Купчасті хмари, що не змикаються між собою, дають змогу бачити поміж хмарами темні тіні на земній поверхні, що своїм контуром повторюють проекцію хмари в плані. Характерно, що купчасті хмари при прямому освітленні Сонця мають експозиційно відмінну яскравість. Тіні хмар на Землі і власні тіні хмар (експозиційні) дають уяву про розташування Сонця в момент знімання його азимута та висоти. За специфікою зображення добре розрізняються всі основні види купчастих хмар.

*Шарувато-купчасті (Sc),* що мають малу відносну висоту, часто розташовуються довгими валами, грядами, вздовж напрямку вітру. Вони формуються здебільшого в холодному вологому повітрі, в підінверсійному його шарі.

*Потужні купчасті вертикального розвитку (Cu cong) хмари* зажди мають вражаючі горизонтальні та вертикальні розміри та особливо велику гаму яскравості: від білого до темно-сірого на окремих елементах однієї хмари.

За виглядом купчастих хмар можна інтерпретувати напрямок та (менш впевнено) швидкість вітру. Часто з вершин хмар вітер зриває її частину і перетворює у шлейф перистих хмар (купчасті волосаті хмари), що на висоті вершин цих хмар витягуються за вітром. Цим самим можна скористатися для визначення напрямку переміщення хмар. Вітроударний бік хмари завжди щільніший та виразніший, ніж завітряний – м'який і розмитий.

*Купчасто-дощові хмари (Cb)* досить легко розпізнають на знімках через характерну купольну і багатокупольну форми, великі розміри, сірий фототон, часто групуються в гряди та вали, орієнтовані за напрямом вітру.

Дешифрування форм хмар під час метеорологічного дешифрування необхідне, оскільки форми хмар тісно пов'язані з тепло- та вологообмінними процесами в тропосері та дають змогу дешифрувати їхню просторову прив'язку та мінливість. Важливим для прогнозу погоди є також вміння дешифрувати характерні хмарні системи, які, по суті, не можна спостерігати із Землі, але дуже добре зображаються на космічних знімках.

*Карти нефоскопічного аналізу.* Карти нефаналізу створюють під час дешифрування хмарності на відповідних знімках. По суті знімок, який трансформовано до картографічної проекції і на якому за допомогою умовних позначень виділяють зображення метеорологічних об'єктів, позначають межі систем хмар, зазначають форми хмар, атмосферні фронти, напрямки руху хмар. Такі карти можуть бути створені також шляхом перенесення дешифрованої узагальненої метеорологічної інформації на бланк карти.

Карти нефаналізу створюють у центрах приймання та опрацювання космознімків і передають фототелеграфом чи через інтернет-канали для використання під час складання місцевих прогнозів погоди, куди космічні знімки безпосередньо не поступають.

***Основні структурні особливості хмарних полів***

*Хмарність атмосферних фронтів.* Системи хмар, властиві для атмосферних фронтів, зображаються на знімках переважно у формі смуг різної ширини, яскравості та структури. Найбільш яскраві і широкі смуги відповідають активним фронтам з інтенсивним висхідним перенесенням мас вологого повітря. Навпаки, вузькі смуги хмар свідчать про малу активність висхідних рухів.

Фронтальні системи хмар зображаються на знімках в більшості випадків як смуги хмар, шириною від однієї до кількох сотень кілометрів. Конфігурація і вигляд фронтової смуги хмар дає змогу визначити вид фронту, що важливо для уточнення синоптичної ситуації в регіоні проходження фронту.

Хмарні смуги *холодного фронту* мають вигляд яскравої неширокої смуги з виразно окресленими краями, довжиною 200–1 000 км, часто з виразними вкрапленнями округлих яскравих плям рис. 5.7). Ці смуги створюються з купчасто-дощових або шарувато-дощових мар. Активні фронти мають смуги неширокі і безперервні, а кволі фронти виглядають звуженими, розмитими, з розривами в смузі хмар. Часто системи хмар холодного фронту складаються з паралельної до фронту смуги розріджених передфронтових хмар, густої смуги хмар зони самого фронту та розрідженої смуги післяфронтових хмар, що вже не мають певного порядку в розташуванні елементів хмарності. Між зазначеними смугами можуть бути безхмарні простори. Крім того, характерною рисою холодних фронтів є дугоподібний прогин в бік теплої повітряної маси (циклонічна кривизна).

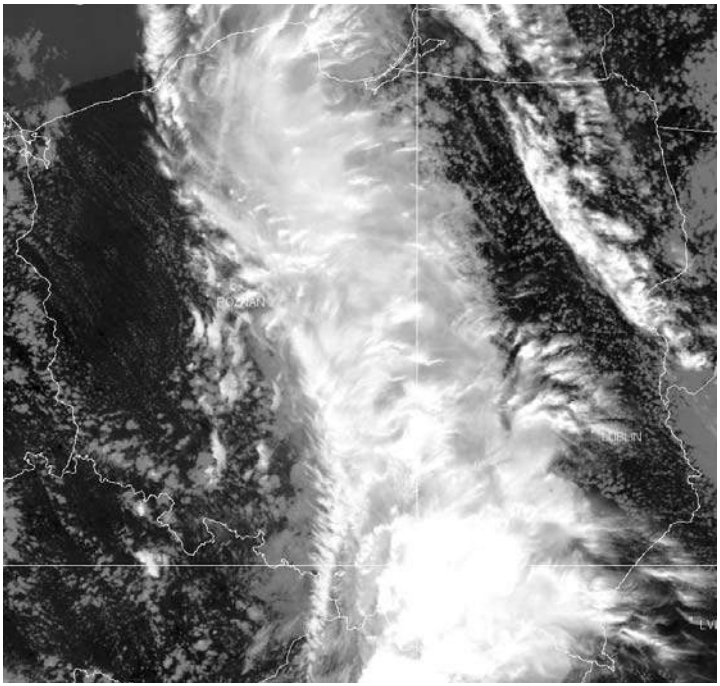



Рис. 5.7. Вал хмар холодного фронту над Польщею.
Видно "волосатість" вершин хмар від розвіювання вітром, виразна межа фронту при землі. Знімок з колекції К. Дзядушинського (УМКС, Люблін).

*Хмарність теплого фронту* також добре видна на знімках, особливо в початковій стадії його формування (рис. 5.8). Проте дешифрування систем хмар теплих фронтів є набагато складнішим, ніж систем хмар холодних фронтів, через те, що системи хмар теплих фронтів дуже різноманітні за розмірами, структурою , рисунком. Ширина такого фронту значно більша і досягає 300–500, зрідка 1 000 км, а довжина від 500 до 1 000 і більше кілометрів. Проходження теплого повітря, що наповзає на холодне, супроводжується формуванням шаруватих хмар від перисто-шаруватих до шарувато-дощових з постійним наростанням їхньої вертикальної потужності та густини. З огляду на це смуги хмар теплого фронту аморфні. Для теплого фронту також характерним є вигин в бік холодної повітряної маси (антициклональний прогин).

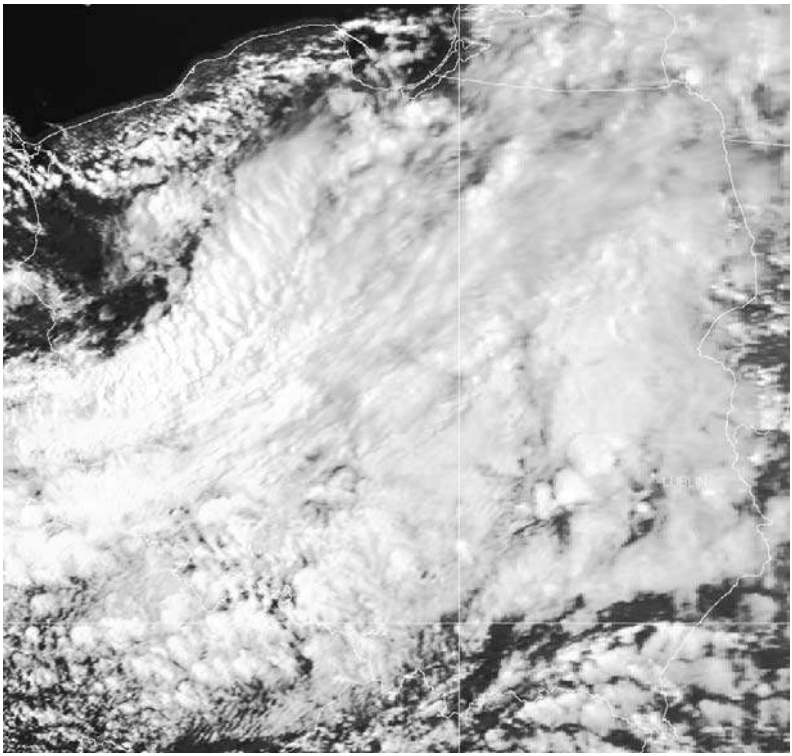


Рис. 5.8. Хмари відносно теплої і вологої повітряної маси проходять над Польщею. Видно розмиті східні краї хмар, їхнє поступове ущільнення та структуризацію до заходу. Знімок з колекції К. Дзядушинського (УМКС, Люблін).

*Хмарність фронтів оклюзії* зображається яскравою смугою хмар шириною біля 300 км. Головна її ознака – спіралеподібна форма, що нагадує велетенську кому. Центр цієї спіралі хмар відповідає центру циркуляції повітряних потоків у циклонічній системі. У разі розвитку процесу оклюзії холодний фронт змикається з теплим, а тому системи хмар теплого фронту накладаються на хмари холодного сектора, проте внутрішні границі фронту оклюзії залишаються виразнішими, ніж зовнішні.

*Хмарність циклонічних систем* мають вигляд великомасштабних спіралеподібних вихрових утворень, складених зі спірально

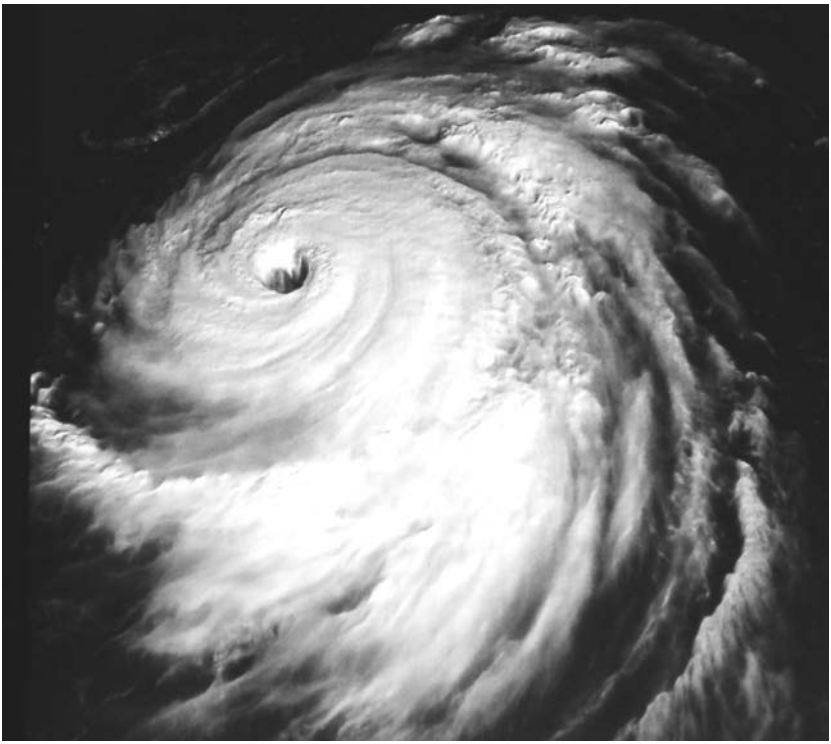


Рис. 5.9. Формація хмар потужного тайфуна. Видно щільні спіралі хмарної маси з отвором в центрі (око тайфуна).

загнутих смуг хмар, сходження яких індикує центр вихрових течій на висоті формування хмар (рис. 5.9). У циклонічних спіралях північної півкулі сходження спіралей відбувається проти ходу годинникової стрілки, а в південній, навпаки, за ходом годинникової стрілки. У кожному спіральному утворенні можна виділити головну спіральну смугу хмар шириною 100–400 км, кривизна якої зменшується з віддаленням від центру хмарного вихору.

Хмарні вихори можуть мати різноманітну форму, як:

- правильні витягнуті спіралі (гіперболічні) з протяжністю понад 1 000 км; ці вихори пов'язані з термічно асиметричними і рухливими циклонами;
- округлі з діаметром диску 500–800 км, характерні для малорухливих циклонів;

- неправильної форми розміром 200–2 000 км зі складною структурою баричного та термічного полів. Утворюються внаслідок об'єднання кількох циклонів або трансформації старого циклона;
- тропічні циклони мають часто чітко окреслену круто загнуту спіраль ланцюгів хмар, або диск з майже концентричних смуг хмар, іноді з безхмарною областю в центрі вихора – так зване "око бурі", "око тайфуна" (див. рис. 5.9).

***Використання радіометричних даних у синоптичному аналізі***

Відомо, що довгохвильове випромінювання в безхмарній атмосфері суттєво залежить від температури радіаційно-активного шару (РАШ), вологості повітря, вмісту вуглекислого газу та інших інгредієнтів у повітрі. Перші два чинники є визначальними, однак внесок температури РАШ у долю випромінювання є більшим від внеску вологості повітря. Третій чинник ($CO_2$), за даними деяких дослідників не завжди впливає однозначно. Відомо також, що за високої вологості і зменшення температури повітря з висотою супроводжується зниженням інтенсивності випромінювання, а зростання температури повітря з висотою (температурні інверсії) призводить до зменшення інтенсивності витратного випромінювання. На витрату довгохвильового випромінювання (вихід у верхні шари атмосфери і космос) суттєво впливає хмарний покрив. За його наявності вихідне випромінювання буде визначатися температурою верхньої поверхні хмар. У випадку підвищення з висотою (інверсії) випромінювання хмар буде посилюватися, а у разі спадання температури з висотою – зменшуватися.

Короткохвильова радіація, що відбивається від хмар та земної поверхні, залежить від кута падіння сонячних променів, альбедо поверхонь та вологості повітря (збільшення вологості сприяє зменшенню випромінювання відбитої радіації). Подані тут закономірності лежать в основі інтерпретації даних фото- і радіометрії випромінюання ЕМХ від РАШ.

Для подальшого тлумачення практичних задач радіометрії необхідно користуватися специфічними термінами, які властиві радіометрії, зокрема терміном *радіаційна температура*. Цим терміном позначають температуру абсолютно чорного тіла, випромінювання якого дорівнює випромінюванню, виміряному з супутника.

Температуру діяльної поверхні можна визначити, виходячи з виміряних значень вихідної радіації в зоні вікон прозорості 8–

12 мкм. Для обчислень застосовують просту формулу, в яку вводять значення функції Планка, температуру діяльної поверхні, вертикальні розподіли температури в стовпі повітря, вологість повітря, функції пропускання озону та водяної пари, кут між напрямком візування та напрямком в надир, показник сферичності атмосфери та інші параметри (всього біля двадцяти). За певних природних та технічних умов дистанційного знімання інформації радіометрами формули значно спрощуються.

## 5.2. Інтерпретація геологічних структур

### *5.2.1. Історія становлення аерокосмічних методів у геології*

Інформація дистанційного зондування Землі дає багатий матеріал з вивчення будови земної кори як у глобальному, регіональному, так і детальному планах. Вже перші роботи вітчизняних і зарубіжних дослідників показали, що аерофото- і космічні знімки містять якісно нову географічну та геологічну інформацію.

Особливу роль у розвитку методики аерофотографічних геологічних досліджень на межі XIX і XX ст. зіграли роботи американського геолога і геофізика У. Хоббса. Він увів у наукову літературу нові поняття: "лінеамент", "мережа лінеаментів", "крок розривів", "віяло розривів". Учений першим почав зіставляти матеріали аерофотознімань земної поверхні з сейсмологічними даними, що дало змогу у багатьох випадках намічати глибинні продовження спостережуваних на аерофотознімках структур. У. Хоббс з дивовижною прозорливістю, використовуючи матеріали нечисленних в його час аерофотознімань, зумів показати геодинамічну і структурну єдність систем розривних порушень, що простежуються на знімках, однонаправленість здвигових зсувів уздовж паралельних один одному розривів на обширних просторах рівнин і плоскогір'їв заходу США і Західної Європи. Значна кількість його праць майже столітньої давності і у наш час є актуальними.

На ранніх етапах аерознімань головними споживачами фотоінформації з літальних апаратів для використання у наукових

дослідженнях та геолого-пошукових роботах стали геологи. З висоти пташиного польоту вони вивчали розломи та локальні геологічні структури для прогнозу і пошуку корисних копалин. Їхню увагу привертали такі структурно-геологічні утворення, як складки, мульди, флексури, розриви, тектонічні тріщини, а також різні комплекси гірських порід. Аерофотознімання гірських територій посприяло вивченню взаємозумовленості та конформності рельєфу і структурно-геологічних утворень. Цінними були дослідження екзогенних процесів, зумовлених структурно-геологічною будовою, які використовували як для прогнозу і пошуків розсипів золота, алмазів, так і для інженерно-геологічних вишукувань під будівництво споруд.

З появою космічних апаратів суттєво розширилось дистанційне зондування Землі. Знімки з їхніх орбіт дали змогу доповнити безперервний масштабний ряд зображень поверхні Землі, отриманий раніше картографічними методами і за допомогою аерофотознімань. Прогрес космічних методів геологічних досліджень земної поверхні тісно пов'язаний як з рівнем розвитку космічної техніки й апаратури дистанційного зондування, так і з новими геологічними дослідженнями океанів та континентів.

Перші фотографії з космосу зробив радянський космонавт Г. С. Титов у серпні 1961 р. з борту космічного корабля "Восток-2". Наприкінці 60-х–початку 70-х років почали планомірне космічне фото- і телезнімання земної поверхні з метою вивчення природних ресурсів Землі. Космічні знімання Землі проводили з штучних супутників Землі типу "Метеор", "Космос", "Лендсат", з пілотованих космічних кораблів типу "Союз", "Джеміні", довготривалих орбітальних станцій типу "Салют", "Скайлеб", "Мир", "Альфа", автоматичних міжпланетних станцій типу "Зонд", "Аполлон", "Вояджер" та ін. Дослідники отримали зображення Землі різних масштабів, оглядовості і роздільної здатності. Знімки привернули увагу фахівців, що займаються геологічним зніманням, прогнозом та пошуками корисних копалин, регіональними узагальненнями геологічної будови, пов'язаними з охороною довкілля і геологічного середовища.

Різноманітні дослідження серед наук про Землю дали змогу суттєво вдосконалити наявні методи в галузі дешифрування космічних знімків. Такі роботи проводили спеціалісти Академії наук СРСР, Лабораторії аерометодів, реорганізованої у ВНДІ-

КАМ (Всесоюзний науково-дослідний інститут космоаерометодів) і Всесоюзного аерогеологічного тресту Мінгеології СРСР, згодом – науково-виробничого об'єднання "Аерогеологія", фахівці з геологічного факультету МДУ, Держцентру "Природа", а також низки галузевих інститутів. Роботи зі знімками спочатку мали дослідно-методичний характер. З'ясовували геологічну інформативність космічних зображень різного масштабу. Відпрацьовували методичні прийоми дешифрування космічних знімків в геологічно відкритих і закритих регіонах, можливості їхнього застосування для вирішення конкретних геологічних завдань. Дослідники мали в своєму розпорядженні одиночні знімки або їхні серії з окремих орбіт. Здебільшого інформація поступала у вигляді чорно-білих, зрідка – кольорових фотографій масштабу близько 1:10 000 000 і дрібніше, а також у вигляді телевізійних зображень малої роздільної здатності з ШСЗ "Метеор". На окремі райони були сканерні і телевізійні зображення з американського супутника природних ресурсів "Лендсат" масштабу 1:1 000 000. Райони досліджень визначалися орбітами космічних апаратів й охоплювали, головно, області гірсько-складчастого поясу Середземномор'я, Середньої і Центральної Азії, Північної Америки.

Результати цих досліджень показали, що космічні методи геологічних досліджень успішно можна й потрібно застосовувати під час проведення геологічного картографування різних регіонів. Вони дають змогу вивчити нові риси геологічної будови земної кори на різних її рівнях, часто дають принципово нову геологічну інформацію. Особливо ефективні космічні методи під час виявлення лінійних і кільцевих структур Землі, вивчення структурно-геологічного прогнозу та пошуків корисних копалин. Переваги космічних методів визначалися можливістю отримання різномасштабного ряду знімків однієї і тієї ж території, вивченням важкодоступних регіонів, оперативністю знімань великих за площею територій, економічною ефективністю.

У 1975 р. було розпочато геологічне картографування території СРСР та окремих її регіонів за матеріалами космічних знімань. У 1978 р. видана "Космофотогеологічна карта Арало-Каспійського регіону" масштабу 1:2 500 000 (редактори В.М. Брюханов, Н.О. Єременко), в 1980 р. – "Космогеологічна карта лінійних і кільцевих структур території СРСР" масштабу 1:5 000 000 (головний

редактор О.Д. Щеглов). У ті ж роки були створені космогеологічні карти території Байкало-Амурської магістралі, України, Якутії, космотектонічні карти Середньої Азії та інших регіонів СРСР. При цьому космогеологічне картування розглядали як метод геологічних досліджень. Космогеологічну інформацію на цих картах опрацьовували в комплексі з геолого-геофізичними даними про будову земної кори.

У США інформативність космічних знімків щодо систематичного вивчення геологічних структур почалася з кінця 60-х років, коли налагодили отримання високоякісних матеріалів знімань з кораблів "Джеміні", "Аполлон", супутника "Лендсат". Результати геологічного дешифрування фотографій, знятих з космосу, були надзвичайно цікавими. Зокрема, виявили невідомі раніше кільцеві структури в Північній Африці, уточнили простягання складок в північній частині Каліфорнійського півострова, встановили низку невідомих раніше антиклінальних структур і розломів у південній частині Північноамериканського материка, а також систему лінеаментів на Близькому Сході. За знімками почали дослідження кінематики розломних структур на основі виявлення зсувних прирозломних структур в районах Середньої і Південно-Західної Азії. Значні зміщення щодо основної площини розлому були виявлені для Таласо-Ферганського розлому. Роботи дали правильні висновки про напрям і природу переміщень Аравійської та Індостанської плит.

Використовуючи інформативність аерофото- і космічних знімань, виділяють такі головні напрями їхнього застосування в американській геології: 1) складання та редакція геологічних і тектонічних карт, зокрема, слабо або недостатньо вивчених і важкодоступних районів; 2) виявлення розривів і вивчення їхньої морфології; 3) аналіз співвідношень структурних малюнків різного порядку: локальних, регіональних і глобального; 4) інтерпретація геофізичних даних; 5) вивчення геоморфології та сучасних геологічних процесів – седиментації, вулканічних явищ (особливо за допомогою інфрачервоних знімків) і контроль над змінами берегових ліній морів, озер, русел рік; 6) застосування космознімків як наочної допомоги під час вивчення геології.

Радянські дослідники розвивали такі напрями в галузі геологічного дешифрування космознімків: 1) тектонічне районуван-

ня; 2) вивчення неотектонічних структур (особливо розривів) і їхніх співвідношень; 3) вивчення глибинної будови земної кори; 4) геоморфологічне районування і розчленування четвертинних відкладів.

Як в радянській, так і в американській космічних геологіях у 70-х роках XX ст. розгорнені широкі дослідження із застосування космічних методів під час пошуків різних видів корисних копалин. Очевидним стає економічний ефект досліджень з використанням цих методів.

Разом з розвитком методики космогеологічних досліджень удосконалюють технічні засоби і апаратуру космічного знімання. У 1975 р. в СРСР почала працювати друга серія метеорологічних супутників "Метеор-2", на яких була встановлена багатозональна сканувальна апаратура (чотири зони спектра). У 1975 р. запущено другу серію американських супутників природних ресурсів "Лендсат-1" (дотепер відомі як ЕРТС) з багатоспекральними сканерами на борту (чотири зони спектра). Починаючи з польоту космічного корабля "Союз-22" (1976 р.) у геологічні дослідження в СРСР активно почали впроваджувати багатозональні космічні фотозображення. Камера МКФ-6, розроблена спільно радянськими і німецькими (НДР) фахівцями, проводила знімання в шести діапазонах спектра і надала в розпорядження геологів фотозображення порівняно високої роздільної здатності. Це дало змогу використовувати космознімки під час великомасштабного геологічного картування.

У 1984 р. на 27-ій сесії міжнародного геологічного конгресу в Москві вперше працювала спеціальна секція дистанційного зондування Землі з космосу. На конгресі була репрезентована космогеологічна карта СРСР масштабу 1:2 500 000, під редакцією Е.А. Козловського, В.Н. Брюханова, Н.В. Межеловського, Легенда карти побудована на виділенні лінійних і кільцевих структур різного масштабу і генезису, а також виявленні структурно-речовинних комплексів з переважаючим характером дислокацій та інтрузивних порід.

Цікава інформація поступає із спеціальних геофізичних і геодезичних супутників серії "Геос", "Сісат", "Космос" та ін. За допомогою геофізичних супутників "Геос-3" і "Сісат" отримані глобальні карти магнітного і гравітаційного полів Землі, проведені

виміри зміни абсолютного рівня Світового океану. Визначили, що аномалії геоїда добре корелюються з тектонічними структурами дна і сучасними геодинамічними процесами. За допомогою лазерів і відбивачів, встановлених на супутниках, визначені амплітуди горизонтальних переміщень літосферних плит. Згідно з міжнародними програмами з використанням GPS-навігаторів проводять виміри кількаміліметрових зміщень структур в зонах розломів і сучасних здвигових деформацій. Унікальну інформацію про будову планети отримали з використанням знімків, знятих в інфрачервоному і радіодіапазонних спектрах електромагнітних хвиль.

На сучасний період розвитку космічних методів припадає поява серії нових багатозональних знімків надвисокої роздільної здатності, які відкривають нові сфери їхнього застосування. На орбіті перебуває нове покоління ресурсних супутників – російських "Ресурс-О", американських "Terra Modis", "Landsat-7", "Quick Bird", IKONOS, європейських "Envisat", французьких SPOT-5 та ін., які надають в розпорядження геологів нові знімки на конкретний район досліджень. Широко впроваджують комп'ютерні автоматизовані методи вивчення геологічних структур, які потребують вивчення геоіндикаційних зв'язків зовнішніх компонентів ландшафтів з геологічною будовою.

Головним завданням космічних методів дослідження на цьому етапі можна вважати вивчення будови, складу і динаміки зміни мас гірських порід земної кори з метою визначення закономірностей, умов формування та розміщення корисних копалин, охорони і раціонального використання навколишнього середовища на основі системного аналізу.

### *5.2.2. Види дистанційних знімань для вивчення геологічних структур*

Для вивчення геологічних структур використовують усі відомі методи космічних знімань: у видимому діапазоні – фотографічні, телевізійні, сканерні знімання, візуальні спостереження, які засновані на вивченні відбитого випромінювання природних об'єктів у видимому та невидимому діапазонах – інфрачервоне, радарне, лазерне та ін. види знімань, які використовують як відбите, так і власне випромінювання природних об'єктів. У видимому

діапазоні досліджують власне геологічні структури, їхню форму, розміри і просторовий розподіл. Головними ознаками є фототон, зміна колірних чи фототональних та яскравісних характеристик зображення, геометричні особливості їхнього малюнка. Під час знімання у невидимому діапазоні спектра отримують інформацію про спектр випромінювання і поглинання природних об'єктів, розподіл теплового поля та ін. фізичних характеристик земної поверхні.

*Візуальні спостереження.* Починаючи з перших польотів пілотованих космічних кораблів, космонавти виконували спостереження поверхні Землі. На перших етапах вони зазначали про відмінності колірної гамми поверхневих утворень, пізнавали гірські системи, великі ріки, акваторії морів. З часом завдяки збільшенню тривалості космічних польотів програма робіт космонавтів ускладнювалася, інформація з космосу ставала все більш цілеспрямованою і детальною. Спеціальні дослідження показали, що людське око здатне розпізнавати предмети, розміщені один від одного на відстані однієї кутової хвилини, тобто при висоті орбіти 300 км розрізняють об'єкти розмірами 100 км. Космонавт В.І. Севастьянов визначив, що зі збільшенням тривалості польоту роздільна здатність людського ока теж збільшується. На перших етапах польоту він мало що розрізняв з космічної висоти, потім почав бачити судна в океані, потім – судна на причалах, а в кінці польоту – окремі споруди на прибережних ділянках. Враховуючи дослідження космонавтів, візуальні спостереження ввели у програму експериментів, які проводять на борту космічних систем.

Перед польотом космонавт-дослідник вивчав геологічні карти, отримані раніше космічні зображення об'єктів, здійснював спільно з геологами аеровізуальні спостереження найтиповіших геологічних структур. На орбіті космонавт-дослідник працював на картах масштабу 1:2 500 000, автоматично орієнтованих в просторі, і вирішував геологічні завдання регіонального і детального плану. Космонавти вивчали і картували лінійні та кільцеві структури, спостерігали в цілому структурно-геологічні умови різних областей Землі. Сьогодні найактуальнішими є спостереження з орбіти за динамікою сучасних геодинамічних процесів, а також за контролем та охороною навколишнього середовища. Результати спостережень оперативно обговорюють фахівці-геологи.

*Сканерні види знімань.* Значний обсяг геологічної інформації нині отримують за допомогою оптико-механічних систем – сканерів. Зазначимо, що сканувальна система активного типу поелементно проглядає місцевість поперек руху носія, посилає на Землю світловий потік і, вловлюючи його відбиття, перетворює променистий потік в електронний. Електронними каналами зв'язку електричний сигнал поступає на приймаючі станції. Під час знімання земної поверхні сканувальні системи формують зображення, кожному елементу якого відповідає яскравість випромінювання ділянки в межах миттєвого поля зору. Сканерне зображення є упорядкованим пакетом яскравісних даних. Його формують смуги – скани, які містять окремі елементи – пікселі. Сканерне зображення отримують у всіх спектральних діапазонах. У геології особливо ефективними є видимий та інфрачервоний діапазони. Найбільше дані зображення використовують для структурно-геологічного аналізу, виявлення великих лінеаментів і розломів, для кінематики тектонічних рухів, а також для прогнозів корисних копалин.

*Фотографічні види знімань.* Для геологічних досліджень використовують фотознімання широкого діапазону спектра і багатозональне фотознімання. Фотознімання в широкому діапазоні видимого спектра проводять на чорно-білій, кольоровій і спектрозональній плівці. Під час знімання на чорно-білу плівку отримують зображення в достатньо широкому діапазоні видимого і ближнього інфрачервоного спектра. Просторовий розподіл поля яскравості на плівці відповідає розподілу поля яскравості геологічних утворень, внаслідок чого виникає змога розрізняти геологічні структури через різну густину фототону (яскравість) зображення.

Чорно-білі зображення використовують для виявлення тектонічних структур різних порядків (наприклад, складчасті пояси і платформи, регіональні і локальні структури); виділення структурних поверхів за структурним малюнком і стилем тектонічних деформацій; виявлення глибинної структури літосфери, вивчення неотектонічного плану земної кори, а також для низки інших, здебільшого структурно-геологічних і тектонічних досліджень. Елементи геологічної структури ліпше виражені саме на чорно-білих знімках, оскільки на їхню інтерпретацію меншою мірою впливають кольори об'єктів природокористування.

Фотознімання на кольорову позитивну і негативну плівки дає змогу розпізнавати літологічні особливості та типи гірських порід – магматичні, метаморфічні чи осадові у відкритих районах за їхніми кольоровими характеристиками. Кольорова плівка має три чутливі шари – червоний, зелений, синій, поєднання яких дає змогу отримати зображення в реальних кольорах. Спектрозональна плівка має два чи три шари емульсії, поєднанням яких отримують зображення в умовних кольорах – червоному та інфрачервоному чи зеленому, червоному й інфрачервоному.

Кольорові зображення характеризуються нижчою роздільною здатністю, ніж чорно-білі. Проте головною метою отримання кольорових зображень є застосування кольорових природних чи умовно-кольорових характеристик як інтерпретаційних ознак для вивчення геологічних утворень. Особливо це актуально для областей аридного клімату, де виникає можливість картографувати різні типи осадових гірських порід і комплексів.

Багатозональне знімання дає змогу отримати одночасно декілька зображень одного і того ж об'єкта в різних більш-менш вузьких спектральних діапазонах (0,04–0,1 мкм). Найбільш інформативною вважають зону, спектральні характеристики якої відповідають максимуму коефіцієнта спектральної яскравості об'єкта, який вивчають. Параметри багатозонального знімання визначають дослідним шляхом за результатами спектрометричного знімання. Багатозональні зображення використовують у різних галузях геологічних наук – у структурній геології, тектоніці, геології четвертинних утворень, петрології, для пошуків корисних копалин та ін.

*Телевізійне знімання.* Під час знімання застосовують оптичні (кадрові) телевізійні системи. Під час кадрового знімання проводять послідовну експозицію різних ділянок Землі за траєкторією польоту. Дослідження можна проводити в режимі безпосередньої передачі даних на приймальні станції або в режимі запам'ятовування і подальшого скидання інформації, коли ШСЗ перебуває поза зоною видимості приймальних станцій. Перевагою космічного телезнімання є велика швидкість і оперативність поряд з невисокою фотографічною якістю і роздільною здатністю. Заважає процесу дешифрування і наявність растрових смуг, властивих телевізійному зображенню. У геологічних дослідженнях для

швидкого реагування на надзвичайні ситуації застосовують катастрофічні зсуви, селі, опливини чи інші процеси, що становлять небезпеку ураження людей чи приносять матеріальні збитки.

*Радіолокаційне знімання.* Дешифрування радарних зображень ґрунтується на тих самих принципах, що і космічних фото- і телезображень, з урахуванням специфіки формування образу об'єкта. Головною інтерпретаційною ознакою геологічних структур на радарних знімках є фототон і текстура зображення. Фототон радарного зображення може змінюватися від світлого до чорного. Чорний фототон відповідає області радіотіні, зонам повного поглинання посланого сигналу та ідеально гладкій поверхні, яка при бічному огляді дає повне віддзеркалення, що йде із зони прийому. Великі ріки завжди мають чорний тон. У разі нормального падіння сканувального променя на поверхню весь відбитий сигнал поступає на приймач, при цьому яскравість зображення буде максимальною. Варіації тону зображення залежать від величини альбедо поверхні і від фізичних властивостей поверхні віддзеркалення.

Текстура радіолокаційного зображення залежить від ступеня розчленованості рельєфу і може бути тонкосітчастою, смугастою, масивною та ін. Смугаста текстура зображення характерна, наприклад, для гірських районів, складених шарами осадових чи метаморфічних порід, що чергуються. Масивна текстура властива для районів розвитку інтрузивних утворень. Добре на радарних знімках читається гідромережа. Вона дешифрована ліпше, ніж на фотографічних чи сканерних знімках.

Високою є роздільна здатність радарного знімання у районах з густою рослинністю. На радарних знімках можуть відображатися такі структурно-геологічні особливості, які через наявність лісової чи сільськогосподарської рослинності є невидимими під час інших видів космічного знімання.

На основі дешифрування радарного зображення складають геологічні, тектонічні та ін. карти. Дешифрування радарних зображень і складання карт проводять спільно з інтерпретацією космічних фото- і телевізійних знімків з урахуванням всієї наявної геолого-геофізичної інформації.

*Спектрометричне знімання.* Під час спектрометричного знімання вивчають фізичні властивості земної поверхні шляхом спектральних вимірів. При цьому фіксують такі оптичні характеристики,

як спектральне альбедо і коефіцієнти спектральної яскравості, що характеризують відбивну здатність і відносну яскравість випромінювання природних об'єктів у вузькому спектральному діапазоні.

Методика спектрометричного знімання полягає у вимірюванні коефіцієнтів спектральної яскравості природних утворень і порівнянні отриманих значень з деяким еталоном із заздалегідь відомою спектральною яскравістю. Як еталон використовують матові скла, гіпсові пластини, що володіють ізотропними властивостями (коефіцієнти спектральної яскравості = 1). Вимірювання коефіцієнтів спектральної яскравості проводять безперервно по трасах польоту, можливі також дискретні (у визначених місцях) спостереження. За коефіцієнтами яскравості розраховують спектральне альбедо.

Спектрометричні дослідження займають великий обсяг у загальному комплексі космогеологічних досліджень. Для вимірювань використовують спектрографи декількох типів. На космічних супутниках типу "Метеор" встановлена багатозональна спектрометрична система "СМП-32", розроблена фахівцями Болгарії. Система призначена для вимірювання коефіцієнтів спектральної яскравості природних об'єктів у видимій і інфрачервоній областях спектра. Виміри проводять по 32 ділянках спектра (каналами), рівномірно розташованих в діапазоні 0,45–0,90 мкм. На борту космічних станцій "Салют" і "Мир" використовували ручні спектрометри "Спектр-15", що працювали у видимому діапазоні спектра. На борту сучасних американських, європейських і деяких російських супутників розміщені автоматичні мультиспектральні сканувальні пристрої.

Програма спектрометричних досліджень передбачає: 1) вимірювання спектральних характеристик природних утворень з метою їхньої ідентифікації; 2) синхронне проведення спектрометричних досліджень на орбіті і на землі з метою отримання даних, що характеризують передавальну функцію атмосфери; 3) вивчення коефіцієнтів спектральної яскравості елементів земної поверхні для визначення ділянки спектра, оптимального для реєстрації даного об'єкта; 4) статистичний набір спектральних характеристик різних типів земної поверхні.

Унаслідок космогеологічних досліджень визначили найбільш інформативні діапазони знімань для вирішення геологічних за-

вдань. Зокрема, для виділення гірських порід необхідно знати 4–6 коефіцієнтів спектральної яскравості в різних діапазонах. Різноманіття природних випромінювачів, випадковий характер їхнього розміщення створюють складну характеристику спектрального поля. Тому виділення і визначення об'єктів за спектральними характеристиками можливе лише за наявності кількісної класифікації. З цією метою створюють банки даних спектральних характеристик шляхом набору інформації як наземними, так і аерокосмічними вимірюваннями (наприклад, дані середніх значень коефіцієнтів спектральної яскравості і спектрального альбедо типових земних поверхонь, які трапляються на певній території, для спектральних діапазонів 0,54–0,56; 0,66–0,69; 0,77–0,80 мкм). Дослідження дали змогу вибрати найбільш інформативні спектральні інтервали для багатозональних знімань.

За альбедо і яскравістю відбиття гірські породи зачислюють, за Є.Л. Кріновим, до першого класу. Визначено, що для них характерне поступове збільшення коефіцієнтів спектральних яскравостей від фіолетової ділянки спектра до червоної (для супісків у фіолетовому діапазоні спектра $r_\lambda$=0,022, в червоній – $r_\lambda$=0,071; для суглинків – від 0,064 до 0,270; для пісковиків – від 0,163 до 0,341; для карбонатних порід – від 0,357 до 0,753 мкм). Це означає, що найбільше інформації для розпізнавання гірських порід отримують у червоному діапазоні спектра.

Складність прикладного використання спектральної індикації для геологічних цілей полягає в значній мінливості і недостатній вивченості спектральних характеристик природних утворень та конвергентності (аналогічності) їхніх спектральних образів.

За результатами спектрометричних досліджень нині визначено, що для розпізнавання гірських порід різного складу у видимій зоні спектра загалом найсприятливіші діапазони 0,52–0,65 мкм (зелено-жовта) і 0,70–0,9 мкм (червона і ближня інфрачервона зони). Використання короткохвильової фіолетової й ультрафіолетової областей спектра для вивчення геологічних утворень на суші несприятливе, але дає максимальну інформацію під час дослідження акваторій.

*Магнітне знімання.* Це один з традиційних й обов'язкових видів знімань під час геофізичного вивчення Землі з космосу. Починаючи з 1958 р., проведено декілька глобальних знімань

магнітного поля Землі. Знімання проводили з ШСЗ "Космос-49", "Магсат" та ін. Супутникові вимірювання магнітного поля ведуть за окремими маршрутами з полярних орбіт, які забезпечують отримання одноразової інформації про магнітне поле планети загалом. Спеціальні автоматичні пристрої дають змогу при будь-якому положенні супутника орієнтувати магнітометри за напрямом дії повної напруги магнітного поля Землі, що дає можливість порівнювати супутникові аномалії різних магнітних широт. Дані супутникових вимірювань обробляють комп'ютерні програми на Землі.

Результати спостережень подають у вигляді окремих кругосвітніх профілів модуля повного вектора магнітного поля або у вигляді карт головного магнітного поля Землі. Воно є низькочастотним полем, яке охоплює глобальні (довжини хвиль 3 000–4 000 км) і великі регіональні аномалії (довжини хвиль 300–400 км). Максимальні і мінімальні значення аномалій дорівнюють, відповідно, +10 і -12 гамм при середній висоті спостережень близько 540 км. Передбачають, що значну частку магнітних аномалій, виявлених за допомогою супутників, зумовлюють особливості геологічної будови. Джерела аномалій розміщені в літосфері і визначаються зміною потужності магнітоактивних шарів літосфери або ж зміною середньої ефективної намагніченості великих ділянок літосфери.

Зіставлення карти супутникових магнітних аномалій з тектонічними картами дає змогу намітити кореляцію магнітних аномалій з тектонічними структурами. Визначено приуроченість позитивних магнітних аномалій до щитів древніх платформ. Такі аномалії виявлені в північній Євразії в межах Анабарського, Алданського і, частково, Балтійського щитів. Подібні залежності виявлені на інших континентах (Австралія, Гренландія, південна частина Індії, південь Африки), хоч є приклади і зворотної кореляції на значній частині Канадського щита, на півдні Балтійського щита і в північно-західній частині Африки. Позитивні аномалії простежуються також у межах складчастих областей на західному узбережжі Північної Америки, на північному сході Росії.

Негативні магнітні аномалії широкою смугою простежують у південній частині Балтійського щита, на Тімано-Печорському кряжі, Уралі, у Західному Сибіру, південній частині Східно-

Сибірської платформи. Значні негативні аномалії виявлені в східній частині Північно-Американського континенту, на північному заході Африки, на півночі Південної Америки. Контрастними позитивними і негативними магнітними аномаліями характеризуються акваторії Арктики, Північної і Центральної Атлантики, Індійського океану. Слабковиражене аномальне поле виявлене в Тихому океані, виняток становлять дві аномалії з амплітудою +6 і -6 гамм біля меридіана 180° і в районах Гавайських островів.

Аналіз глобального магнітного поля Землі і зіставлення його з іншими геолого-геофізичними даними дали змогу визначити зв'язок між супутниковими магнітними аномаліями і термічним режимом літосфери, намітити кореляцію між швидкісними неоднорідностями верхньої мантії з варіаціями супутникових аномалій магнітного поля. Намічені ними закономірності в розподілі довгохвильових магнітних аномалій знаходить пояснення в розміщенні зон підвищених і знижених значень геотермічного градієнта. Розміри і планове положення термічних аномальних зон збігаються з магнітними аномаліями. При цьому позитивні магнітні аномалії приурочені до областей зниженого (10–20° С/км) геотермічного градієнта, негативні магнітні аномалії – до областей зростання геотермічного градієнта (20–50° С/км).

Зазначені закономірності дали змогу визначити деякі можливості використання супутникових магнітних знімань для геодинамічних побудов. Зокрема, за супутниковим магнітним зніманням були зіставлені магнітні аномалії Східного узбережжя Північно-Американської плити і Західного узбережжя Африканської плити, які відтворили зону розколу єдиної ранньоюрської плити.

У зв'язку з розвитком космічного магнітного знімання стало можливим вивчення не лише магнітного поля Землі з різних висот, а й отримання інформації про магнітне поле інших планет.

*Гравітаційне знімання.* Сьогодні вдосконалення космічної техніки зробило можливим вимірювання гравітаційного поля Землі за допомогою супутників. Оскільки вимірювання сили тяжіння в умовах невагомості є неможливим, карту аномалій сили тяжіння складають не зовсім звичайним способом. Ці аномалії визначають за величиною відхилення висоти геоїда над загальноземним еліпсоїдом. Завдяки нескладним перерахункам від висоти геоїда можна перейти до значення потенціалу сили тяжіння. Переви-

щення геоїда над еліпсоїдом відраховують по нормалі до еліпсоїда, воно може мати як позитивні, так і негативні значення. Відхилення висоти геоїда вимірюють за відхиленням реальної траєкторії (висоти) супутників від розрахункових. Високочастотні, тонші, компоненти зміни структури гравітаційного потенціалу вивчають, використовуючи систему "супутник–супутник" і дані супутникової альтиметрії (висотометрії).

Карти висот геоїда над загальноземним еліпсоїдом показують, що геоїд характеризується великими хвилями широтного і довготного простягання, що охоплюють цілі континенти. Зокрема, варіації висот геоїда в планетарному масштабі не пов'язані з рельєфом, а відображають неоднорідності мас на великих глибинах. Значна частина Австралії й Атлантичного океану характеризуються позитивними висотами геоїда, проте Азія та Антарктида – негативними. Виділяють декілька планетарних аномалій висот геоїда розмірами в поперечнику 3 000–5 000 км (Індійська – -105 м, Північноатлантична – +66 м, Карібська – -64 м, Каліфорнійська – -256 м, Мозамбікська – + 51 м), а також ряд великих збурень висот геоїда (Чилійське – +44 м, Канадське – -48 м та ін.). Не менший інтерес представляють планетарні градієнтні зони зміни потенціалу сили тяжіння.

Супутникове гравітаційне знімання фіксує аномалії сили тяжіння, пов'язані не тільки з приповерхневими геологічними структурами, а й з неоднорідностями мантії. Аномалоутворювальні чинники розміщені на великій глибині, зокрема, вважають, що вірогідною причиною горизонтальних неоднорідностей можуть слугувати зони контрастної зміни хімічного складу речовини, її фазового переходу на глибинах 400 і 700 км. Деякі з цих неоднорідностей знаходять своє підтвердження в будові земної кори. Зокрема, Андинська аномалія (-105 м) за площею збігається з широкою зоною внутріплитних деформацій. Найбільші градієнтні зони Урало-Африканська і Австрало-Азійська відбиваються в геодинамічному режимі корових структур.

Високочастотні вимірювання варіацій поверхні геоїда були проведені альтиметрами з ШСЗ "ГЕОС-3", "Сісат" та ін. Визначили, що топографія поверхні океану повністю відповідає великим лінеаментам рельєфу дна морів і океанів, серединно-океанічним хребтам, глибоководним жолобам і западинам, великим зонам

розломів і підводним горам. Вдалося спрогнозувати нові системи розломів, невідомі підводні гори. Перевірочні маршрути дослідницьких суден на акваторіях підтвердили наявність цих об'єктів.

*Лазерне знімання.* Нині намічені два напрями їхнього використання. Один з них пов'язаний з високоточними геодезичними вимірюваннями, здійснюваними за допомогою космічних апаратів, другий – з отриманням спектральних і голографічних характеристик природних об'єктів.

Для високоточних вимірювань відстаней між пунктами на Землі використовують монохромне лазерне випромінювання. Повторні спостереження такого роду дають змогу фіксувати відносні амплітуди і швидкість зсувів як окремих структурних утворень земної кори, так і літосферних плит. У рамках національної програми США з вивчення землетрусів і глобальної геодинаміки з 1983 р. тривають роботи з мережі лазерного стеження спеціального ШСЗ "Лагеос". Ця мережа охоплює декілька десятків наземних стаціонарних станцій, встановлених в різних районах Землі, а також тимчасових рухливих установок, що розташовуюють у зонах підвищеної сейсмічності. Основа станції – телескоп з двохлінзовим об'єктивом і двома плоскими дзеркалами, що направляють лазерний промінь на супутник. Лазер посилає 5–10 періодичних сигналів на секунду. Від супутника сигнал повертається через 50–80 мс і дзеркалом, що обертається, направляється на приймач. Запізнювання вимірюється з високою точністю. Для визначення відстані з точністю ±1,0 см вистачає декількох хвилин роботи лазера. Вимірювання проводять періодично, фіксуючи горизонтальні (по мережі станцій) і вертикальні (на стаціонарі) переміщення.

Вивчення горизонтальних переміщень плит літосфери виконують за допомогою вимірювань лазерним далекоміром відстаней до супутника або до кутових відбивачів, встановлених на Місяці. Точність вимірів складає ±1,0 см. За допомогою лазерних далекомірів визначена швидкість горизонтальних переміщень Індо-Австралійскої плити щодо Антарктиди, яка дорівнює 4,5 см/рік. Визначена швидкість розширення (спредінга) Північної і Центральної Атлантики: станції, розташовані на Північно-Американському континенті і в Європі, переміщаються одна відносно одної зі швидкістю 1,9 см/рік. Отримані величини сумірні зі швидкістю спредінга Північної Атлантики, розрахованої за геологічними даними.

Станції, розташовані в межах Північно-Американської плити, не зареєстрували відносного переміщення усередині плити.

Дані лазерного визначення відстаней до супутника дали змогу виявити тектонічні деформації в межах Канадського щита, пов'язані з геодинамічними процесами земної кори Північної півкулі. За допомогою лазерних далекомірів виміряні висоти багатьох гірських вершин. Вперше складені топографічні карти Гренландії та Антарктиди. Проведені вимірювання внутріплитних деформацій західної частини Середземноморського поясу і відносні переміщення Європи. На початку XXI ст. виконували також дослідження горизонтальних переміщень у зоні зчленування Панонської плити і Карпатської покривної структури.

Зондуючі установки, що складаються з лазера і приймального пристрою, застосовують для аналізу спектрального складу випромінювання, розсіяного або такого, що поглинається речовиною приземистого шару атмосфери чи підстилаючої поверхні (метод лідарної спектрометрії). Лідарна спектрометрія є методом геохімічного знімання, направленим на виявлення підвищеного вмісту деяких хімічних елементів в атмосфері або на земній поверхні. У лідарах використовують потужні імпульсні лазери, що генерують випромінювання у фіолетовій частині електромагнітного спектра (0,26–0,28 мкм). Телескоп в лідарі є передавальною і приймальною антеною. Лідарна спектрометрія дає змогу фіксувати аномальний вміст деяких елементів або сполук, які можуть засвідчувати наявність похованих скупчень вуглеводнів, сульфідних руд, глибинних газових еманацій.

### *5.2.3. Методика геологічного дешифрування дистанційних зображень*

*Методи інтерпретації.* Фотографічні властивості земної поверхні, її фізіономічність залежить від різноманітності природних утворень території, яку вивчають. Ці природні утворення тісно пов'язані з геологічним субстратом, визначають спектральні і фототонові неоднорідності та геометричний малюнок космічного зображення. Геологічна інтерпретація космічних зображень є рішенням зворотної задачі – складання геологічної моделі досліджуваного регіону за характеристиками електромагнітного випромінювання, поданого в аналоговій (фотошар) або цифровій формі.

При геологічній інтерпретації космічних зображень розрізняють контрастно-аналоговий і ландшафтно-індикаційний методи. При *контрастно-аналоговому методі* аналізують фотоградієнтні зони, площадні фотоаномалії, текстуру зображення, які безпосередньо ототожнюються з певними геологічними об'єктами, без аналізу причини формування даної фотоаномалії.

*Ландшафтно-індикаційний метод* ґрунтується на пошуках кореляції фотоаномалій із зовнішніми і внутрішніми компонентами ландшафту. Визначення цього зв'язку дає змогу характеризувати геологічний об'єкт на космічному зображенні опосередковано через особливості морфології земної поверхні, ґрунтового і рослинного покриву, планового розташування ерозійної мережі та інших природних індикаторів. Ландшафтно-індикаційний метод найуспішніше використовують під час геологічного дешифрування космічних знімків геологічно закритих регіонів. Застосування методу можливе під час аналізу знімків локального і регіонального рівнів генералізації. Контрастно-аналоговий метод застосовують у разі дешифрування космічних зображень будь-якого рівня генералізації. Під час дешифрування зображень глобального і континентального рівнів він стає провідним. Під час дешифрування космічних зображень регіонального і детального рівнів генералізації найефективніше комплексне дешифрування з використанням контрастно-аналогового і ландшафтно-індикаційного методів.

*Ознаки інтерпретації.* На знімках великих і дрібних масштабів інтерпретаційні ознаки геологічних об'єктів відрізняються. Це пов'язане з впливом оптичної генералізації зображень та узагальненням контурів об'єктів. Зокрема, на аерофотознімках чи великомасштабних космознімках ознакою розривного порушення часто є прямолінійна протяжна аномалія темного фототону, якій відповідає ділянка ріки чи заболочена улоговина. На знімках середніх і дрібних масштабів ця фотоаномалія може розчинитися в кількості інших елементів зображення або утворити певний структурний малюнок. Тому ознаки виділення його можуть бути іншими, зокрема, лінійна текстура зображення.

Загалом на аерофотознімках для дешифрування геологічних об'єктів використовують безпосередні (прямі) ознаки – *площинна конфігурація і лінійні обриси, фототон (на чорно-білих) чи колір (на кольорових знімках)*, а також *об'ємні форми*, характерні для тих чи

інших геологічних об'єктів. На космічних знімках головними ознаками розпізнавання геологічних утворень є *форма, розміри, структура, текстура зображення, фототон чи колір.* Непрямими ознаками розпізнавання на аерофото- і космічних знімках є *геоморфологічні, геоботанічні, антропогенні і зоогенні*. Характер інтерпретаційних ознак геологічних об'єктів зумовлюють рельєф, ступінь його ерозійної розчленованості і вивітрювання, розподіл рослинності, стиль деформації геологічних формацій, їхній структурний малюнок і текстура.

Форма виходу геологічних тіл на поверхню та їхні розміри – дві важливі дешифрувальні ознаки. На космічних знімках виділяють лінійні, кільцеві, площинні та інші форми фотоаномалій, які ідентифікують геологічні структури. У низці випадків форма може виявитися безпосередньою дешифрувальною ознакою певних геологічних структур. Наприклад, однозначно за округлою формою розпізнають сучасні вулканічні споруди, інтрузивні утворення, які виходять на поверхню. У більшості випадків геологічну природу виділених фотоаномалій з'ясовують шляхом залучення додаткових даних. Зокрема, лінійні фотоаномалії відображають лінійні неоднорідності ландшафту і можуть бути зумовлені геологічними утвореннями різного генезису. Розміри розпізнаваних на космічних зображеннях структур значною мірою визначаються їхньою роздільною здатністю.

Структура і текстура зображення – визначальні дешифрувальні ознаки під час інтерпретації космічних зображень глобального і регіонального рівнів генералізації. Вони виявлені неоднорідностями будови і складу поверхні, зумовленої особливостями розчленовування місцевості (рельєф, ерозійна мережа), а іноді і розподілом рослинності. Зокрема, у відкритих районах штрихова, периста чи решітчаста текстура зображення засвідчують важкорозмивні масивні породи, неправильно-смугаста – легкорозмивні глинисті, смугасто-коміркова – лесові відклади (рис. 5.10). У платформенних областях структурний малюнок свідчить про характер та інтенсивність тектонічних деформацій не лише чохла, а й фундаменту. У складчастих зонах структурний малюнок залежить від парагенезу тектонічних структур і дає змогу з'ясувати кінематику розривних порушень, їхню глибинність. За стилем деформацій визначають літологічну характеристику розрізу.

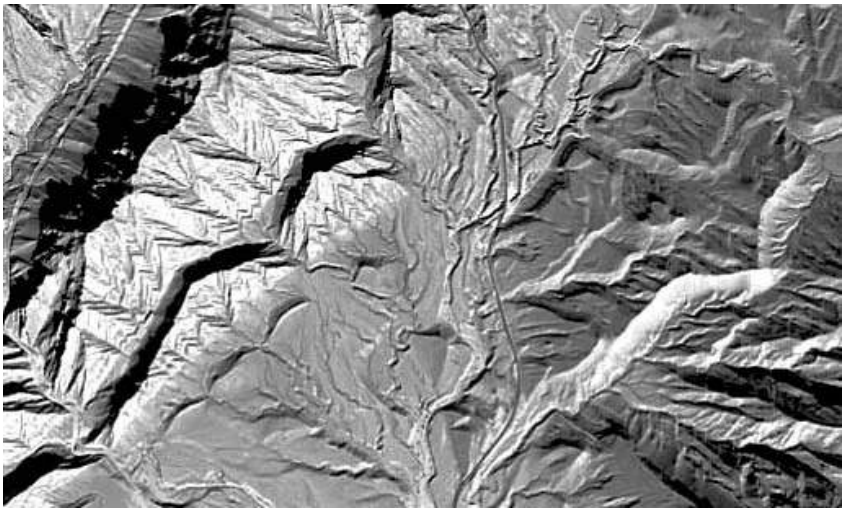
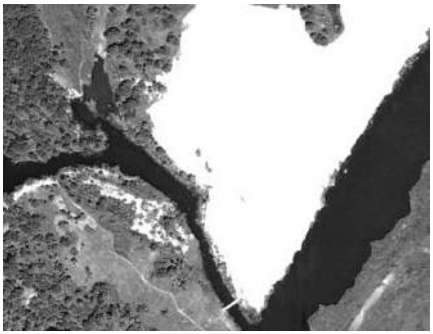
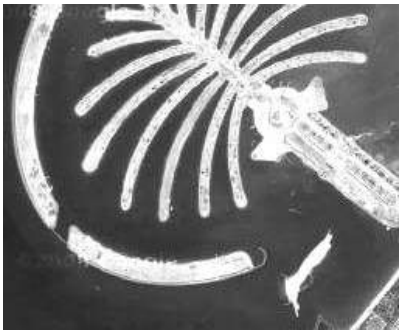


Рис. 5.10. Текстура зображення як ознака відображення властивостей і типів порід (гори Загрос в Ірані): у північно-західній частині знімка периста текстура свідчить про масивні важкорозмивні породи, в центральній неправильносмугаста – на легкорозмивні глинисті відклади. За фототоном видно чітку границю між ними.

Фототон на чорно-білих чи колір на кольорових знімках застосовують для інтерпретації геологічних об'єктів у тих випадках, коли достатньо великі площі території (відносно роздільної здатності зображення) зайняті однорідними об'єктами. Фототон чи колір використовують як показник спектральної відбивної здатності різного типу порід, що виходять на поверхню і не покриті рослинністю (рис. 5.11). Роль фототональних чи колірних ознак неоднозначна і змінюється залежно від стилю тектонічних структур, ступеня оголеності порід, клімату, фізичних властивостей поверхні, рівня генералізації дистанційних матеріалів.

Під час розпізнавання геологічних об'єктів за фототоном чи кольором виникає низка труднощів, найважливіші з яких: полімінеральний склад гірських порід, нівелювання індивідуальних кольорових чи фототональних характеристик гірських порід корою вивітрювання, наявність рослинного покриву та ін. Тобто фототон чи колір залежать від оптичних і фізичних властивостей геологічних тіл, а також від вторинних, накладених процесів. Ці





*а* *б*

Рис. 5.11. Яскраво-білий фототон відкритих пісків на знімках великих масштабів. Штучно намиті піски: *а* – на березі р. Дніпро, *б* – "пальмовий" острів біля м. Дубаї (ОАЕ).

ознаки є провідними як під час аналізу знімків детального, так і регіонального рівнів генералізації, коли за лінійними змінами фототону чи площинними фотоаномаліями виділяють окремі порушення або узагальнені, інтегральні характеристики великих геологічних неоднорідностей.

*Непрямі ознаки*, які широко використовують у геологічних дослідженнях, відображають на знімках геологічні об'єкти, що не безпосередньо нас цікавлять, а компоненти ландшафту, пов'язані з геологічною будовою. Такі природні взаємозв'язки найчастіше встановлені між геологічною будовою і формами рельєфу, будовою ерозійної мережі (рис. 5.12), особливостями розподілу і роз-

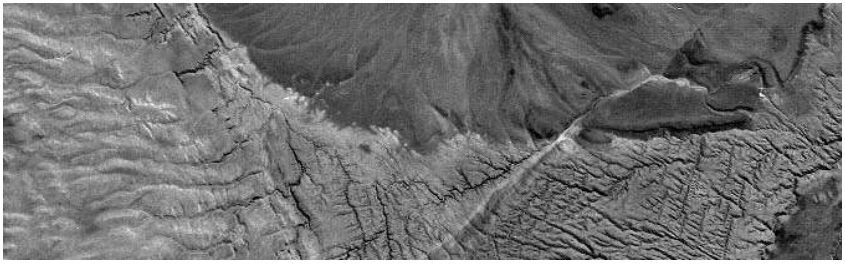


Рис. 5.12. Решітчаста будова ерозійної мережі є індикатором тектонічної тріщинуватості порід (пустеля Атакама у Південній Америці).

витку рослинного покриву, різними проявами життєдіяльності людини, а іноді і тварин, що отримують своє відображення на дистанційних матеріалах.

Індикаторами геологічних структур є геоморфологічні, геоботанічні, антропогенні і зоогенні об'єкти. *Геоморфологічні* непрямі ознаки ґрунтуються на тісних природних взаємозв'язках між геологічною будовою території, формами рельєфу та будовою ерозійної мережі. За формами рельєфу (особливо його мезо- і мікроформами) та будовою дрібної ерозійної мережі дешифрують границі поширення різних типів гірських порід або їхніх комплексів, умови залягання, різні елементи складчастої і розривної тектоніки, а також досить впевнено визначають та описують фізико-географічні процеси, що розвиваються серед порід різного складу. За характером рельєфу ідентифікують деякі фізичні властивості порід, зокрема міцність, тріщинуватість, водонепроникність. Наприклад, за крутими відкосами і структурними уступами дешифрують міцні породи, пологі схили свідчать про податливі породи. Карстові і суфозійні форми виявляють розчинні властивості наявних порід, зокрема, виходи на поверхню карбонатних чи сульфатних порід.

*Геоботанічні* непрямі ознаки, ґрунтуються на наявних природних взаємозв'язках між материнськими ґрунтотворними породами, ґрунтовим покривом і рослинністю. Під материнськими породами у цьому випадку розуміють як пухкі, так і міцні гірські породи, яким властиві ті чи інші фізико-географічні властивості, гідрогеологічні особливості, хімічний склад тощо, які впливають на утворюваний ними ґрунт і розвиток самої рослинності. На основі цих взаємозв'язків визначена приуроченість окремих рослин чи рослинних угруповань до гірських порід того чи іншого речовинного складу, до певних гідрогеологічних та мерзлотних умов, до ґрунтів з різним ступенем засолення і навіть до ділянок проявів ряду корисних копалин.

*Антропогенні і зоогенні ознаки.* Часто як непрямі ознаки дешифрування геологічних об'єктів використовують ознаки, зумовлені діяльністю людини і тварин. Наприклад, вузькі, чітко окреслені колії ґрунтових доріг свідчать про наявність глинистих і суглинистих відкладів на цій ділянці; роз'їжджені колії, значна кількість проміжних колій біля основної свідчать про піщані і

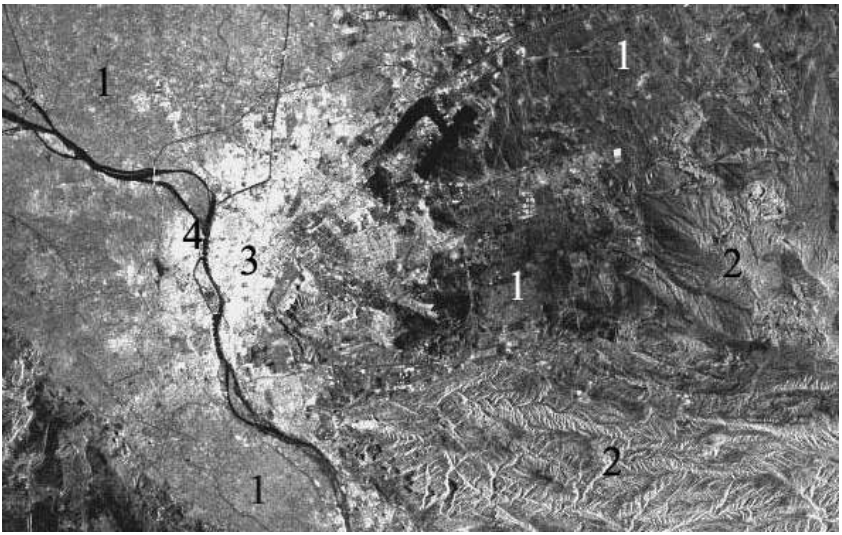



Рис. 5.13. Господарське використання території як непряма ознака властивостей порід: *1* – освоєні ділянки на пухких відкладах, *2* – неосвоєні ділянки на міцних породах, 3 – білий фототон незадернованих пісків, 4 – русло р. Ніл.

супіщані відклади. Антропогенні і зоогенні ознаки ґрунтуються на пристосуванні людини і деяких тварин певним чином до фізико-географічних умов, а іноді й до геологічних особливостей району свого місцезнаходження (рис. 5.13).

*Етапи дешифрування*. Геологічну інтерпретацію космічних зображень проводять у три етапи: попереднє дешифрування, польова перевірка віддешифрованих об'єктів, камеральна обробка і остаточне дешифрування.

На етапі попереднього дешифрування виконують підбір космічних зображень необхідного типу і якості та здійснюють їхню географічну прив'язку. Залежно від цільової установки підбирають масштабний ряд аерофото- і космічних знімків. Одні знімки повинні відповідати масштабу дослідження, інші – мати вищий і нижчий рівні генералізації. За наявності багатозональних знімків проглядають зображення в усіх зонах спектра для визначення найбільш інформативних його діапазонів з метою розв'язання поставлених завдань. Розглядають і вибирають найвиразніші варіан-

ти синтезованих знімків. Після вибору типів знімків виконують попереднє дешифрування вибраних космічних зображень. На основі інтерпретації зображень складають схему попереднього дешифрування та розробляють легенду до неї, яка є класифікацією і систематизацією елементів геологічного середовища. Розпізнавання контурів і природи геологічних утворень виявляють за набором наявних геолого-геофізичних карт та геологічних розрізів. У процесі дешифрування виділяють фотоаномалії, проводять фільтрацію і вибраковування об'єктів негеологічної природи. За результатами дешифрування аерофотознімків і космознімків різних рівнів генералізації здійснюють оцінку рангу виділених структур, виявляють нову додаткову інформацію щодо наявних уявлень про геологічну модель території.

Польову перевірку результатів дешифрування проводять на ключових ділянках. При цьому, зазвичай, виконують аеровізуальні спостереження, конкретизують дешифрувальні ознаки для об'єктів різного типу. Проводять комплекс необхідних геолого-геофізичних досліджень. У закритих регіонах виконують ландшафтно-геоморфологічні спостереження. Головна мета польових спостережень – перевірка геологічної моделі, складеної на попередньому етапі обробки, з'ясування геологічної природи фотоаномалій і конкретизація дешифрувальних ознак.

Камеральна обробка передбачає проведення системного аналізу дистанційних зображень. Визначають геологічну природу, вік і глибинність виявлених аномалій. Складають таблиці дешифрувальних ознак геологічних об'єктів. Уточнюють легенду і складають тематичні карти відповідного дослідженням масштабу. На основі створеної моделі виконують прогнозування.

Зазначений порядок роботи з космічними знімками умовний, оскільки під час роботи дослідник, зазвичай, неодноразово звертається до первинного матеріалу, складає декілька схем дешифрування. Вибір остаточної моделі повинен відповідати рівню сучасної вивченості регіону і давати приріст інформації.

У зв'язку зі збільшенням потоку інформації і необхідністю оперативної обробки космічних зображень нині розроблені й удосконалюються методи автоматизованої обробки з використанням комп'ютерних технологій. Програмні продукти використовують на різних стадіях обробки і геологічного дешифрування зображень.

Для підвищення надійності геологічного дешифрування на підготовчому етапі проводять додаткові процедури тематично орієнтованих перетворень. Найбільшого поширення набули процедури підкреслення контурів з використанням колірних і фототонових відтінків з метою розпізнавання образу. Людське око зазвичай розрізняє близько 100 колірних відтінків і лише вісім–десять чорно-білих градацій фототону. Кількість градацій колірних і фототонових відтінків під час автоматизованої обробки, по суті, необмежена. Для оптимізації подання космічного зображення виконують квантування, виділення контурів за градієнтами перепаду яскравості зображення, підкреслення контурів, отримання псевдокольорового зображення, фільтрацію, еквалізацію та інші операції. Всі ці процедури призначені для подальшої тематичної обробки.

На етапі тематичного дешифрування космічних зображень застосування програмних пакетів полягає у безпосередньому виділенні геологічних об'єктів за площинними, лінійними і кільцевими фотоаномаліями з використанням кількісних даних про розподіл величин спектральних яскравостей природних утворень. При цьому, маючи спектральні характеристики апріорі відомих геологічних об'єктів, можливо вирішити завдання розпізнавання образу. Проте рішення цієї задачі, зазвичай, утруднене унаслідок надзвичайної мінливості характеристик, відображених на знімках природних компонентів. Тому застосування програмних засобів дає змогу вирішувати окремі завдання для конкретних територій.

У програмах – растрових редакторах можливе підкреслення контурів півтонових градацій яскравостей для виділення візуально невиразних на початкових матеріалах геологічних об'єктів. Для геологічної інтерпретації використовують також різного роду фільтри, текстурного, які підкреслюють ті чи інші фототональні аномалії на знімках. Завдання дешифрувальника – підтвердити чи спростувати геологічну природу виділених аномалій.

Серед геоінформаційних програм для геологічних цілей найвживаніші програми SURFER, MapInfo. Значного поширення і застосування набули дослідження з виявлення лінійних фотоаномалій, лінеаментів. При цьому наявні програми дають змогу отримувати кількісні характеристики лінійних фотоаномалій:

щільність лінійних фотоаномалій різних напрямів в ізолініях, рози-діаграми та ін.

Використовуючи програму MapInfo, колективу авторів під керівництвом Кузьменко Е.Д. з Івано-Франківського університету нафти і газу вдалося експериментально встановити закономірні зв'язки між величинами ймовірностей виникнення зсувів і зсувної небезпеки за комплексної дії природно-техногенних чинників.

Розробляють також окремі спеціальні програми, за допомогою яких на космічних зображеннях виділяють кільцеві і лінійні структури. Програми складені так, що можуть виявляти ці об'єкти за формальними фототоновими характеристиками або ж давати спеціалізацію цих структур на основі геоіндикаційних моделей. Зокрема, на базі обчислювального комплексу "Прогноз" об'єднання "Аерокосмогеологія" успішно вирішено завдання виявлення на чорно-білих аерофотознімках кімберлітових трубок у геологічно закритих регіонах. Вдалося отримати хорошу збіжність результатів автоматизованого і візуального дешифрування. Для виділення об'єкта тут було узято дві дешифрувальні ознаки: темний фототон кімберлітових трубок на світлому фототоні вміщаючих порід і кільцеву форму темних площинних фотоаномалій, які відповідають місцям розташування трубок.

Отже, методика геологічної інтерпретації аерокосмічної інформації ґрунтується як на автоматизованому дешифруванні об'єктів у програмних пакетах, так і великою мірою, на візуальному, ручному дешифруванні знімків з використанням досвіду дешифрувальника та узгодженням результатів з наявною геолого-геофізичною інформацією.

### *5.2.4. Інтерпретація видів геологічних утворень*

Геологічна інтерпретація аерофото- і космічних знімків передбачає два аспекти досліджень – *структурно-тектонічний та літологічний*. Під час структурно-тектонічного дешифрування за знімками виділяють площинні геологічні структури; лінійні порушення у вигляді розломів, розривів, тріщин; їхню кінематику та прояви на поверхні Землі неотектонічних рухів. Літологічне дешифрування охоплює вивчення за допомогою аерокосмічних методів особливостей літології порід – типів порід, їхніх фізичних властивостей, умов залягання тощо.

***А. Структурно-тектонічне дешифрування.***

***Інтерпретація глибинних геологічних структур***. Вже перші спроби дешифрування космічних знімків показали великі можливості їхнього використання для уточнення областей розповсюдження різних тектонічних структур. Виявили нові риси земної поверхні, невідомі раніше, або такі, яким під час наземних досліджень не надавалося належного значення, наприклад, лінеаменти і кільцеві утворення.

Одна з головних переваг космічних знімків – можливість побачити нові риси будови території, непомітні при ближчому розгляданні, – належать передусім до вивчення великих геологічних структур. Втрата малих деталей унаслідок оптичного узагальнення зображень дає змогу просторового поєднання розрізнених фрагментів великих геологічних утворень у єдине ціле.

Нагадаємо, що за тектонічними рухами, характером та інтенсивністю проходження процесів на земній корі розрізняють такі геологічні структури:

1) стійкі платформенні області; 2) рухомі пояси.

*Платформенні області* охоплюють материкові та океанічні платформи, що характеризуються слабким проявом тектоніки. У межах материкових платформ розрізняють *древні*, складені рифейськими і палеозойськими породами, і *молоді платформи*, сформовані мезозойськими і кайнозойськими породами. Найстійкішою частиною древніх платформ, їхнім ядром, яке утворилось унаслідок тривалих піднять, є *щити* (Балтійський, Байкальський, Канадський, Український Арабо-Нубійський, Індійський, Гвіанський та ін.). Частини молодих платформ, які зазнавали тривалих опускань, називають *плитами* (Західно-Європейська, Волино-Подільська). На платформах, окрім зазначених, існують структури регіонального плану, такі як *антеклізи* (підняті тектонічними рухами області – Білоруська, Воронезька) і *синеклізи* (опущені області – котловина Балтійського моря, Паризька, Ютландія, Мещерська, Прикаспійська, Прибалхаська, Конго і Таудені в Африці і т.п.). Малі структурні форми на платформах – це *вали і прогини, флексури і розриви, горсти і грабени, склепіння, куполи і мульди* (відповідно, додатні і від'ємні).

*Рухомі пояси* відрізняються різко диференційованими рухами значної амплітуди з великими градієнтами. Вони існують у вигляді *орогенних*, в яких переважали загальні підняття, та *геосин-*

*клінальних областей* – зазнавали тривалих опускань, на фоні яких виникали окремі зони піднять, втілені у гірських ланцюгах. Усі додатні структури рухомих поясів називають *антикліналями*. За величиною їх поділяють на мегаантиклінорії (Альпійсько-Гімалайський, Тихоокеанський, Урало-Монгольський), антиклінорії (Альпійсько-Карпатський, Тібетський) і антиклінальні складки (окремі підняті масиви в гірських країнах). Від'ємні структури рухомих поясів, амплітуда насувів і піднять яких була меншою, ніж у сусідніх структурах, називають *синкліналями*. За розмірами розрізняють мегасинклінорії, синклінорії (передгірські прогини, міжгірські депресії) і синклінальні складки.

*Платформенні області на космічних знімках* відображаються мозаїчним малюнком зображення. Проте цей малюнок творять безпосередньо не геологічні структури, а поверхневі природні чи антропогенні форми. Вони формують на знімках плямисті, гратчасті, зернисті та однорідні структури зображення. Платформенні області належать до закритих територій, оскільки фундамент, за винятком щитів, похоронений під чохлом осадових відкладів, зокрема, четвертинних. Потужність чохла досягає декількох сот, а інколи і тисяч метрів. Тому для інтерпретації геологічної структури платформенних областей застосовують непрямі ландшафтно-індикаційні ознаки. Основні індикатори – рельєф і рослинність.

За ландшафтно-індикаційними ознаками на космознімках континентального рівня генералізації простежуються найбільш великі і глибинні структури фундаменту і чохла. У їхніх межах за структурою зображення виділяють тектонічні блоки з різним режимом розвитку – тривалими невеликої амплітуди опусканнями чи підняттями. Межі блоків збігаються з лінеаментами, які в більшості випадків є зонами розломів.

На регіональних і локальних космознімках та аерофотознімках виділяють структурні блоки низьких порядків, що мають здебільшого однонаправлені тектонічні рухи. Ознаками виділення тектонічних блоків на платформах є структура і текстура зображення земної поверхні, темніший або світлий фототон на фоні навколишнього зображення.

Серед характеристик рельєфу важливими ознаками інтерпретації геологічних структур є його розчленування та гіпсометрія. Зіставляючи гіпсометричні характеристики рельєфу з різними

структурними картами чохла і фундаменту, а також геофізичними матеріалами, на космознімках виділяють відносно підняті й опущені блоки. Підвищеним ділянкам рельєфу в структурі фундаменту відповідають підняття – виступи фундаменту, горсти, а зниженим – западини, грабени. Таку залежність пояснюють переважно успадкованим розвитком багатьох новітніх структур з палеозою або більш раннього часу. Новітніми підняттям і западинам вищого рангу часто відповідають деформації чохла. Відносно підняті і опущені ділянки платформ розпізнають також за малюнком річкової і балкової мережі, контурами побереж морів та озер. Піднятим ділянкам платформ відповідає густіше розчленовування рельєфу в поєднанні зі складним дендритовим малюнком долин і вододілів, пониженим – рідша мережа долин і слабке розчленування. У межах піднятих блоків простежується звуження долин і слабкий розвиток алювію, в опущених блоках – розширення долин і розвиток алювіальних відкладів.

Зазначимо, що для платформ характерна мала амплітуда горизонтальних і вертикальних рухів та деформацій. Вона на порядок нижча від амплітуди деформацій у складчастих гірських областях, де деформації безпосередньо виражені в рельєфі земної поверхні. У платформенних областях наявність тектонічних елементів у більшості випадків можна тільки припускати за непрямими ознаками. Дешифрування космознімків при цьому дає змогу виділяти деформації навіть малоамплітудні, перші десятки метрів, які не завжди уловлюються геофізичними або іншими методами. Це особливо важливо під час пошуків і прогнозування нафтогазоперспективних структур.

Спостереження відображених на денній поверхні великих геологічних структур полегшує інтерпретацію даних про глибинну геологічну будову. В цьому розумінні геологи висунули думку про пряму залежність між оглядовістю знімків і глибинністю геологічних досліджень: чим більша оглядовість знімків, тим глибинніші структури можуть бути на них відображені. Фрагменти глибинної структури на космознімках простежуються через товщу поверхневих відкладів за своєрідним структурним рисунком чи за фототональними відмінами.

Структурами особливого типу, які виявлені за результатами інтерпретації космознімків *є кільцеві структури*. Під кільцевими

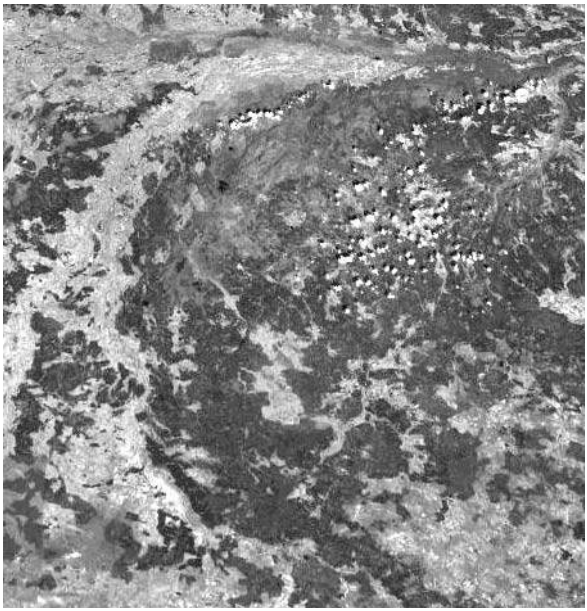


Рис. 5.14. Дуга кільцевої структури,
яку успадкувала р. Стохід на Поліссі.

структурами розуміють геологічні утворення різного генезису, що мають на рівні сучасного денудаційного зрізу ізометричну (кільцевидну, округлу, дугоподібну) форму.

Кільцеві структури виявляють різними *методами*: геологічними (зніманням), геоморфологічними (аналіз будови рельєфу), геофізичними (аналіз магнітних і гравітаційних аномалій). Проте головним методом є дешифрування аерофото- та космічних матеріалів. Тут виділяємо стадії аналізу аерофото- і космічних знімків: виявлення та ідентифікації.

На стадії виявлення на знімках різних типів і масштабів за різними фотоаномаліями розпізнають кільцеві структури – світлими чи темними порівняно з навколишніми ділянками. Фотоаномалії мають вигляд площинного суцільного кругового контуру, кільця чи дуги (рис. 5.14). Вони пов'язані з ландшафтними (рослинність, ґрунти, рельєф) особливостями в межах структур і поза ними, а також літологічним складом порід, тектонічними, гідрологічними умовами та ін.

Для надійнішого підтвердження виявленої кільцевої аномалії переглядають комплекс космознімків, знятих у різні сезони і в різних діапазонах спектра. На такого роду знімках посилюються окремі елементи ландшафту, ступінь розчленованості тощо, які різкіше підкреслюють кільцеву фотоаномалію.

Кільцеві структури на знімках не завжди чітко розпізнавані. Вони можуть бути виразно чи невиразно вираженими, або слабо помітними.

На другій стадії дешифрування виявлені на космознімках кільцеві структури геологічно інтерпретують, тобто визначають їхнє походження, вік, морфологію на підставі зазначених вище геологічних, геоморфологічних, геофізичних методів.

Геологічні методи інтерпретації кільцевих об'єктів передбачають визначення їхнього зв'язку з відомими геологічними утвореннями – інтрузіями, тектонічними структурами та ін. Для цього контури кільцевих структур зіставляють з контурами геологічних утворень, не лише поверхневих, а й глибинних, досліджують літологію і вік порід усередині кільцевих структур та за їхніми межами. При цьому може бути повний збіг контурів структури і геологічного об'єкта, наприклад, інтрузії чи вулканічної форми, або частковий. Частковий збіг може бути пов'язаний з тим, що не все геологічне тіло зосереджене на поверхні, а лише його верхня частина.

У контури великих кільцевих структур потрапляє безліч різнорідних і різновікових геологічних утворень, сформованих відмінними геологічними процесами, – магматичними, метаморфічними, тектонічними. Зокрема, ці геологічні процеси, зазвичай, значно молодші, ніж ті, якими утворена велика кільцева структура. Тому визначення генезису великих кільцевих структур є важким завданням. Необхідно залучати всі наявні геологічні матеріали – структурні карти крівлі фундаменту і горизонтів осадового чохла, результати глибинного сейсмозондування, які висвітлюють структуру поверхні астеносфери, Мохоровичича, Конрада тощо, а також палеотектонічні, палеогеографічні, палеовулканічні, літолого-фаціальні, петролого-структурні, формаційні та ін. Використовують і порівняльно-планетологічні дані, щоб визначити процес, або частіше декілька процесів, під дією яких сформувалася первинна кільцева структура.

Під час зіставлення з геофізичними матеріалами невеликі кільцеві структури можуть повністю збігатися з аномаліями, а великі і складно побудовані кільцеві утворення, зазвичай, мають складні геофізичні поля концентричної або дугової будови. Найбільші кільцеві структури відображені в змінах потужності земної кори і положенні крівлі верхньої мантії. На підставі цього геофізичні методи дають змогу зазначати глибинність процесів, які беруть участь у формуванні кільцевих структур. Використання детальних електророзвідувальних робіт дає змогу виявляти тектонічні порушення на кільцевих структурах, визначати їхній кут нахилу.

Кільцеві структури можуть бути утворені одним чинником – матаморфогенним, магматогенним, тектономорфогенним, або сформовані спільною дією декількох процесів, наприклад, тектоно-магматичні структури. Окремо виділяють структури складного генезису – нуклеари та імпактні структури. Екзогенні ізометричні структури, такі як карстові чи суфозійні лійки, тут не розглядають.

*Метаморфогенними кільцевими структурами* є гнейсові складчасті овали і гранітогнейсові куполи. Вони характерні для областей розвитку докембрійських порід на щитах древніх платформ; зрідка вони трапляються в орогенних областях. Гнейсові структури досягають 200–400 км в діаметрі, гранітогнейсові – від перших кілометрів до 50, зрідка 300–400 км.

*Магматогенні кільцеві структури* – це плутонічні (інтрузивні), вулканічні (рис. 5.15) або вулкано-плутонічні утворення. Вони розвинені як на платформах, так і в орогенних поясах. Розміри структур від перших кілометрів до 300–400 км.

Формування магматогенних кільцевих структур відбувалося з пізнього докембрію протягом всього фанерозою в різні тектоно-магматичні епохи. Інтрузивні кільцеві структури, пов'язані з коровим магматизмом, широко репрезентовані в Середземноморському, Урало-Тяншанському, Верхояно-Чукотському, Північно- і Південно-Американському та інших складчастих поясах різного віку. Зрідка кільцеві структури цього типу розвинені на древніх платформах, наприклад, Коростельський плутон або масиви гранітів рапаківі в межах Східно-Європейської платформи. Вулканічні структури представлені щитовими вулканами, стратовулканами, кальдерами-куполами, діаметри яких від 20 до 150 км.

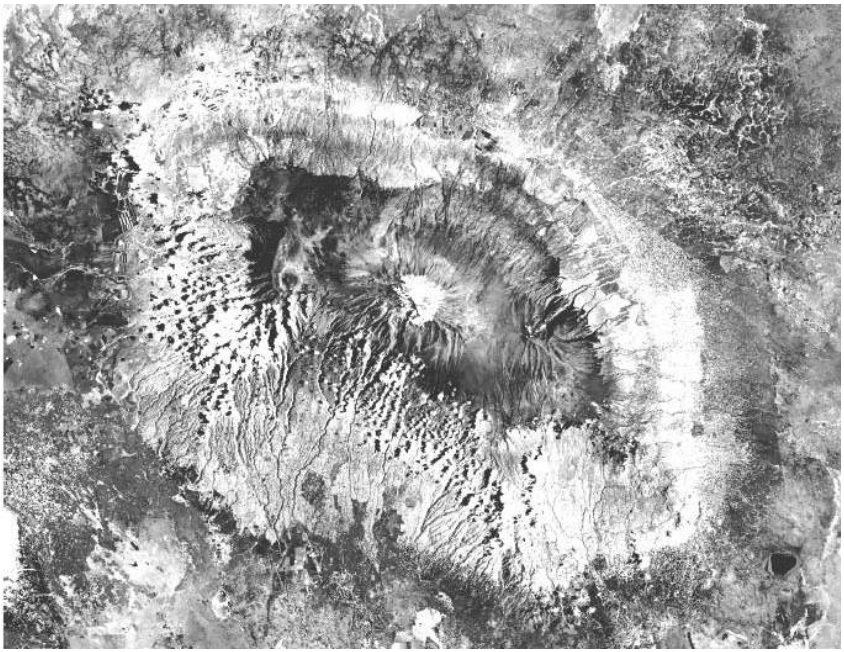


Рис. 5.15. Кільцева структура вулкану Кіліманджаро в Африці.

*Тектоногенні кільцеві структури* утворились унаслідок тектонічних рухів, переважно вертикальних. Найбільш широко розвинені на древніх і молодих платформах (рис. 5.16). За морфологією виділяють додатні, від'ємні і складної будови. Розміри структур – від першого десятка до декількох сот і навіть тисяч кілометрів. Додатні структури являють собою антеклізи, склепіння, виступи фундаменту. Як ізометричні утворення відображаються на космознімках також полігональні блоки кристалічного фундаменту, що трансформуються через платформенний чохол на поверхню. Від'ємні кільцеві структури на платформах репрезентовані синеклізами, мульдами.

*Нуклеари* – це складного генезису великі кільцеві системи, ускладнені багаточисленними меншими кільцевими структурами різного генезису. Досягають до декількох тисяч кілометрів у діаметрі. Передбачають, що нуклеари виникли на місячній стадії розвитку Землі 4,6–4 млд років тому. Відомо близько півсотні таких структур. Наприклад, Північно-Американський нуклеар, діаметр якого

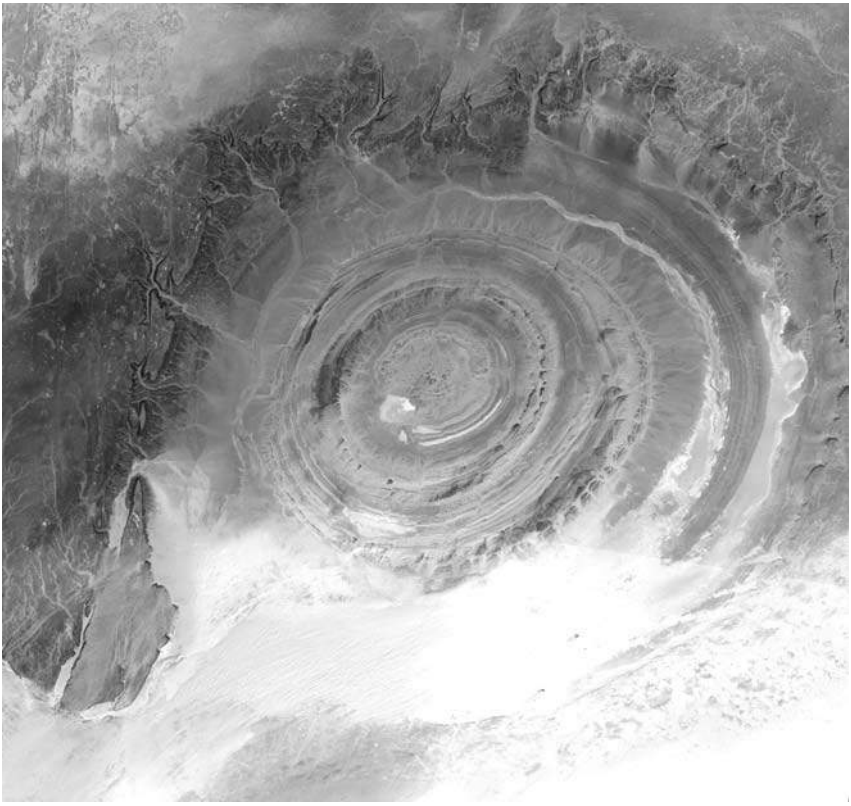


Рис. 5.16. Кільцева структура Рішат в Мавританії
ймовірно тектоногенного походження.

3 800 км, Західно-Африканський (3 600 км), Амазонський (3 200 км), Центрально-Африканський (2 800 км), Скандинавський (500 км) та ін.

*Імпактні* кільцеві структури представлені кратерами, розміри яких вимірюють десятками кілометрів і метрами. На космознімках їх виділяють за ідеально ізометричними формами, в рельєфі виражені пониженнями; у деяких кратерів збереглись фрагменти валів, центральних піднять. Відомими імпактними структурами є Попігайська (найбільша – 170 км в діаметрі), Арізонська, Седбері в Канаді та ін. Доказами їхнього імпактного походження є сліди ударного метаморфізму. Вважають доведеними походження більше 100 таких структур, які відобразилися на космознімках.

За знімками виконали *аналіз просторового поширення генетичних типів кільцевих структур*, який показав, що в різних тектонічних областях переважають структури певного генезису, морфології, віку і розмірів. На щитах платформ найчастіше простежуються структури матаморфогенного і магматогенного типів, закладені в гранітогнейсовому фундаменті; вік, відповідно, архейсько-протерозойський і фанерозойський. На інших частинах платформ кільцеві структури мають здебільшого тектоногенне походження і фанерозойський вік. В орогенних областях різного віку кільцеві структури представлені магматогенними і тектоногенними типами, причому вік структур залежить від віку складчастості. Нуклеари, як найбільш древні і тривало розвинені гігантські утворення, охоплюють великі простори як платформенних областей, так і рухомих поясів. Вік їхнього закладання доархейський.

За знімками визначили *розміри кільцевих структур*. За величиною їх поділили на чотири класи: 1) мегаструктури з діаметром в багато сотень – перші тисячі кілометрів; 2) макроструктури діаметром в перші сотні кілометрів; 3) мезоструктури, величиною від 10–15 км до 150 км; 4) мікроструктури, що не перевищують 10–15 км у діаметрі. Визначено, що розмір структур безпосередньо пов'язаний з глибиною їхнього закладання. Найбільші мега- і макроструктури мають мантійне закладання, мезо- і мікроструктури здебільшого – корове. Аналіз геофізичних полів показав, що зв'язок структур з глибинними горизонтами може бути встановлений детальніше. Зокрема, для корових можливе виділення структур, пов'язаних з базальтовим, гранітним або осадово-метаморфічними шарами.

На основі інтерпретації космознімків визначають *прості і складні форми кільцевих структур*. Прості структури виявлені у вигляді кільця, овалу або круга; складні мають концентричну будову. Як складні, так і прості кільцеві структури можуть мати замкнуті контури або бути фрагментарними, неповно кільцевими, що часто пов'язане зі зрізанням структур розломами.

Отже, на платформенних областях за допомогою дистанційних методів виділяють різновеликі тектонічні блоки, визначають їхню припіднятість чи опущеність один відносно одного, характер їхніх границь. Виявляють також особливий тип структур – кільцеві.

*Рухомі пояси на космічних знімках* виділяють за характерною густою мережею ліній, смуг чи коротких штрихів, яку творить гірський розчленований рельєф. Така лінійно-штрихова структура зображення добре видима на фоні навколишньої плямистої структури рівнинної території.

На знімках континентального рівня генералізації видно генеральний план складчастої області – прямий, дугоподібний, масивний, S-подібний чи ін. На таких знімках відокремлюють основні орографічні елементи: гірські хребти і масиви, які індикують системи піднять, та міжгірські чи передгірські впадини, що відповідають системам прогинів.

Знімки регіонального рівня несуть інформацію про невеликі системи піднять чи прогинів. На знімках їх індикують додатні чи від'ємні форми рельєфу. Зокрема, гірські хребти несуть інформацію про антикліналі чи горсти; впадини різного порядку, долиноподібні зниження і долини свідчать про синкліналі чи грабени. Виявляють також морфологію і кінематику розривних порушень, що січуть орогени. За інтенсивністю вертикального і горизонтального розчленування рельєфу читають деталі геологічних структур.

Антиклінальні структури складчастих областей як найбільш підняті структури на космознімках виділяють за складним малюнком ерозійного розчленування. Ці малюнки різні залежно від літології та умов залягання порід, експозиції схилів, тривалості та інтенсивності розвитку піднять як форм рельєфу, але вони завжди легко відрізняються від малюнку днищ впадин і долин. Дрібність і глибина розчленовування піднять тим більша, чим довше вони розвиваються як форми рельєфу, що в більшості випадків залежить від їхнього віку. Достатньо порівняти глибоко розчленовані високоамплітудні підняття – хребти Тянь-Шаню, Гімалаїв, Кордільєрів та ін., таких, що оформилися в рельєфі вже в початкову стадію (кінець палеогену – початок неогену) новітнього етапу горотворення, з хребтами Північного Сходу Азії, Прибайкалля, Карпатами, де швидкість та амплітуда піднять були набагато нижчі, а час появи в рельєфі – більш пізнішим (міоцен – пліоцен).

Від'ємні структурні форми – западини, депресії – це новітні тектонічні прогини, що розвиваються або відмерли і пасивно залучені в піднімання суміжних областей. Вони були, а на окре-

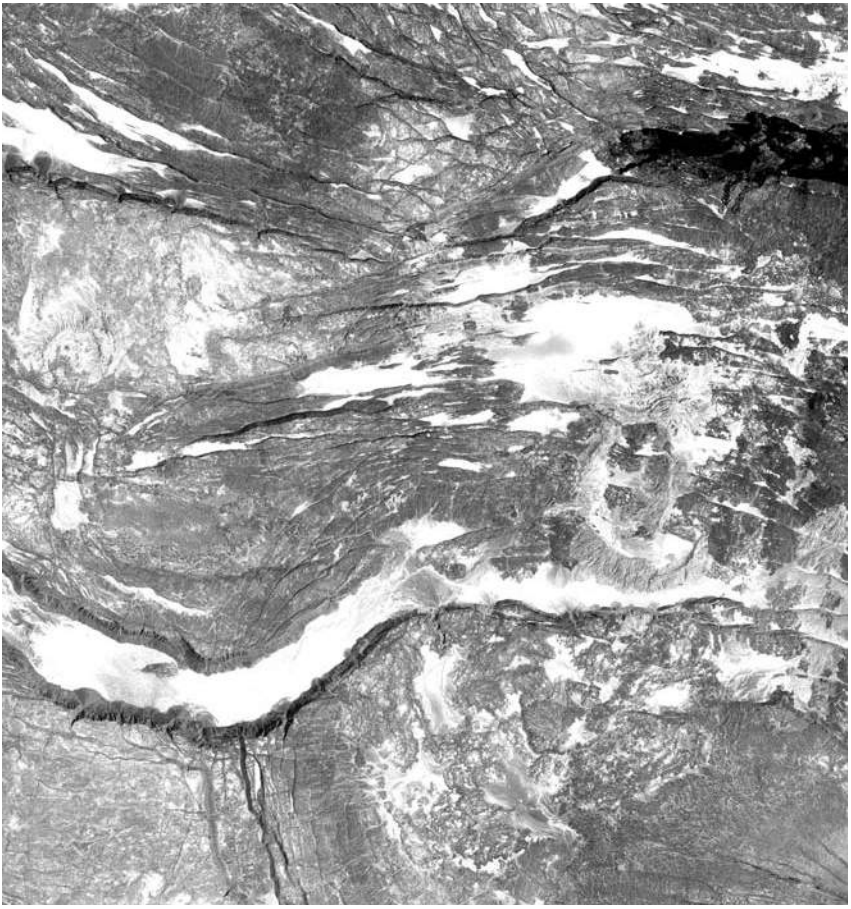


Рис. 5.17. Тектонічна депресія широтного простягання (гори Середньої Азії).

мих ділянках є зонами акумуляції уламкового матеріалу і характеризуються відповідними формами рельєфу. Це – терасовані алювіальні або слабкохвилясті пролювіальні рівнини (рис. 5.17). У загальному випадку дрібність і глибина розчленовування акумулятивних рівнин тим менша, чим молодша рівнина. Це дає змогу достатньо упевнено виділяти на космознімках, особливо на середньо- і великомасштабних, зони різновікових акумулятивних рівнин і, отже, вже на знімках намітити загальні закономірності новітнього розвитку тектонічних прогинів.

На космознімках локального рівня генералізації та аерофотознімках дешифрують окремі складчасті структури, такі як *антиклінальні чи синклінальні складки.* Їх виявляють за характером рельєфу, за певною закономірністю в розміщенні і формі гірських хребтів, складених стійкішими породами. Топографічна виразність добре проявляється під час дешифрування складок, у будові яких беруть участь осадові породи, складені товщами і пластами, що різко відрізняються один від одного за літологічним складом і фізико-механічними властивостями. Будова складок у рельєфі часто підкреслена наявністю куест, характерних для пологих крил складок, іноді наявністю додатних форм чи, навпаки, понижень у ядрах синкліналей чи антикліналей. Велике значення мають форми мезо- і мікрорельєфу під час дешифрування порід різного складу та віку для встановлення їхніх взаємовідношень і контактів.

Під час дешифрування складок разом з характером рельєфу вивчають як загальний рисунок гідромережі, так і конфігурацію та орієнтування окремих річкових долин, які часто зумовлені структурними особливостями району. Зокрема, радіальний рисунок гідромережі часто свідчить про периклінальне замикання антиклінальної складки. Взаємно паралельне розміщення долин з асиметричними схилами засвідчує наявність моноклінального залягання порід на крилах складок. У місцях занурення складок водотоки часто огинають їх. Зазначають субсеквентні долини ріки, приурочені до пластів порід, що мають найменшу стійкість; обсеквентні – течуть в напрямі, зворотному до падіння пластів і ресеквентні, що течуть вздовж падіння пластів.

Антиклінальні і синклінальні складки проявляються в рельєфі також рядом симетрично розташованих до їхнього ядра скалистих ланцюгів чи лінійно витягнутих підвищень.

У прямих чи симетричних антикліналях падіння пластів всюди скеровано в бік від ядра складки так, що вершини пластових трикутників[4] повернуті до осі складки.

У простих симетричних синклінальних складках пласти всюди нахилені в бік осі складки, а пластові трикутники своїми верши-

---

[4] Пластові трикутники – поперечні до простягання хребтів ребра, що відповідають виходам пластів і свідчать про нахилене залягання гірських порід.

нами повернуті в протилежну сторону. У зоні центриклінального замикання синкліналі обидва крила складки, сполучаючись, утворюють чашоподібне обрамлення, складене пластовими фігурами, які нахилені до ядра синкліналі.

За знімками визначають також асиметричність складок, яку дешифрують за різною крутизною їхніх крил. Крутизну крил виявляють за збільшенням чи зменшенням як ширини самих крил, так і висоти пластових фігур.

На аерофотознімках і великомасштабних космознімках завданням структурно-тектонічного дешифрування є також виділення дрібних структурних елементів орогенних областей. Вони найчіткіше відображені у формах мезо- і мікрорельєфу. Це вузькі, гострі, зубчасті гребені хребтів; різкі, часто скелясті форми вершин гір у вигляді піків, голок, пірамід; різні останці; ланцюги скель; відпрепаровані грані схилів, їхні ребристі, лускуваті форми; уступи; чітко виражені гребені куестоподібних форм рельєфу; різкі перегини схилів тощо. Скелі і скелясті уступи розпізнають на знімках за характерною звивистою формою, різкими й зубчастими обрисами, виразним чергуванням освітлених і затінених ділянок схилів. У разі стереоскопічного розглядання "височать" гребені, піки, карнизи, відокремлені останцеві форми, які виділяються серед навколишньої поверхні, навіть якщо замасковані рослинністю.

***Інтерпретація розривних порушень.*** Розривні порушення серед елементів геологічної будови найліпше інтерпретовані на дистанційних матеріалах. Важливість їхнього вивчення полягає в тому, що вони зумовлюють блокову будову земної кори і, будучи зонами підвищеної проникності, часто контролюють розміщення родовищ корисних копалин. Для виявлення і трасування розривів знімки стали незамінним матеріалом, оскільки мають значну оглядовість й ультрагенералізацію деталей будови поверхні Землі.

Розривні порушення за величиною і глибинністю поділяють так:

1) планетарні, глибинні розломи, які трасують континенти, їхні платформенні та орогенні області, січуть верхню мантію і нижню частину земної кори. На поверхні проявляються зоною дроблення гірських порід, ширина якої змінюється від десятків метрів до десятків кілометрів залежно від типу розлому і характеру порушених порід. Читають на дрібномасштабних космознімках за зміною фототону чи лінійними фототональними аномаліями;

2) регіональні корові розломи, які перетинають окремі чи сусідні регіони в межах платформ та рухомих поясів, охоплюють земну кору і приповерхневі пласти порід. На середньомасштабних космознімках інтерпретують за лінією чи смугою зміни елементів структури зображення;

3) локальні розриви і тектонічні тріщини, закладені у товщі корінних та пухких порід, поширені на окремих ділянках геологічних структур. Розпізнають як лінії чи прямолінійні смуги на великомасштабних космознімках та аерофотознімках.

Загалом *прямими ознаками виділення на знімках розривних порушень* є такі геологічні ознаки: а) порушення суцільності геологічної структури, а також зміщення в плані фотомаркувальних пластів, контактів порід, дайок (рис. 5.18) і т.п., їхнє зрізання чи зчезання вздовж якої-небудь прямої лінії; б) порушення умов залягання пластів, тобто слабко помітна чи різка зміна їхнього простягання вздовж однієї лінії, поворот голів пластів і т.п.; в) прямолінійний контакт між різновіковими і різнодислокованими породами, який виражений у різких відмінах малюнка фотозображення товщ, які контактують по розлому; г) наявність зон зминання, брекчіювання, розсланцювання, лінійні прояви магматизму і вулканізму.

До *непрямих ознак виділення розривних порушень* належать геоморфологічні і гідрогеологічні та геоботанічні. Геоморфологічні ознаки: а) тектонічні прямолінійні уступи чи тектонічні під-

Рис. 5.18. Інтрузія магматичних порід (дайка) як ознака виділення тектонічного розлому (Зімбабве).

ніжжя схилів, вздовж яких проходить прямолінійна границя між корінними і пухкими породами, тектонічні долини і котловини, оточені крутими схилами; б) вузькі прямолінійні (чи слабко вигнуті) пасма і гребені, утворені дайковими чи жильними тілами, що заповнюють пустоти розривів; іноді простежують за фототоном – як вузькі світлі чи темні смуги (рис. 5.19); в) прямолінійні улоговини чи ерозійні борозни, поперечні до нахилу схилу; різко виражені в рельєфі сідловини на вододілах, витягнуті в одну лінію; г) спрямлені ділянки річкових русел, долин, тимчасових водотоків або повторюваність спрямлення водних потоків під певним кутом; коліноподібні вигини русел рік; прямолінійна направленість протилежних бічних приток, які становлять єдиний напрям; зміщення гідромережі вздовж протяжної лінії; лінійне розташування озерних впадин, заболочених ділянок, карстових лійок; спрямлення лінії морських та озерних берегів, болотних

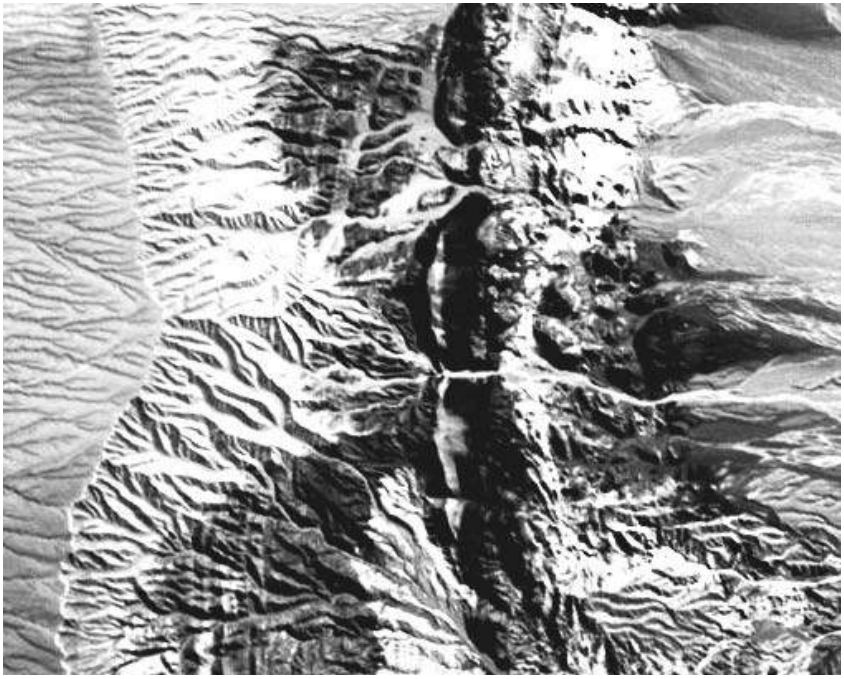


Рис. 5.19. Прямолінійні гребені хребтів свідчать про тектонічний розлом.

котловин; д) прямолінійні різкі границі між різними формами рельєфу чи природними ландшафтами.

Гідрогеологічні та геоботанічні непрямі ознаки розривів: а) лінійне розташування джерел у поєднанні з розвинутою в місцях виходу вологолюбною рослинністю; б) більш чіткі прояви смуг підземного стоку, які в зоні порушення порід вздовж розлому більш обводнені і які виявляють на знімках темнішими фототоном; в) приуроченість до ліній розломів більш густої і вологолюбної рослинності, що пов'язане з більшою зволоженістю і ліпшими умовами ґрунтотворення на цих ділянках.

Зазначені прямі і непрямі ознаки по трасі розлому можуть змінювати одна одну. Наприклад, зміщення геологічних границь вздовж розлому на одних ділянках може змінитися тектонічним уступом, спрямленим річковим руслом чи лінійним розподілом рослинності.

В процесі інтерпретації визначають такі *характеристики розривних порушень*: розміри, напрям та амплітуда горизонтального, а там, де це можливо, і вертикального зміщення, морфологія, генезис, відносний вік того чи іншого розлому. Ознаками новітніх розломів при цьому є зміщення гідромережі, четвертинних чи неогенових відкладів, різка прямолінійна границя між ділянками з різним рельєфом, різна глибина ерозійного розчленування, перебудова гідромережі з утворенням річкових перехоплень та ін. У деяких районах з новітніми тектонічними порушеннями пов'язаний вулканізм четвертинного віку, виходи гідротермальних джерел, прояви сейсмічності.

За результатами інтерпретації дистанційної інформації виділяють дві категорії розривів: ті, що дешифровані на знімках і відображені на геологічних картах; і ті, які віддешифровані на знімках і не зазначені на геологічних картах. Це пояснюють тим, що один і той самий розлом на різних своїх ділянках за протяжністю виражений неоднаково. Місцями зона дроблення, що супроводжує розрив, замала для того, щоб розпізнати його на космознімках, але досить чітко виражена для його виявлення під час геологічного знімання. На інших ділянках зона розриву розширюється, він ніби розсіюється у вигляді численних тектонічних тріщин, утворюючи зону підвищеної тріщинуватості, яка є найсприятливішою ділянкою земної кори для її руйнування екзогенними процесами та утворення спрямлених відрізків долин.

*Інтерпретація кінематики розривних порушень.* Серед кінематичних характеристик розривних структур виділяють здвиги, насуви, скиди, накиди і вертикальні зміщення. Їхніми індикаторами є форми та елементи рельєфу. Найліпше розпізнають на знімках зони *здвигових* деформацій, що пояснюють наявністю комплексів форм рельєфу, орієнтованих поперек чи діагонально до загальної геоморфологічної зональності (рис. 5.20). Здвиги проявляються у таких особливостях геоморфологічної будови, як планові зміщення елементів рельєфу вздовж системи ерозійних улоговин. Такі планові здвиги краще розпізнають на знімках, ніж вертикальні тієї ж амплітуди. Здвиги також читають за характерними вигинами лінійних додатних форм рельєфу. Якщо здвигові деформації не локалізовані у вузьких розривних структурах, а займають широкі зони, то лінійні елементи рельєфу, що їх перетинають, набувають S- чи Z-подібної форми. Це добре дешифроване на космознімках, якщо у здвиговій зоні переломлюється багато лінійних елементів рельєфу.

Чітко виражені у формах рельєфу і добре видимі на аерофото- і космічних зображеннях поперечні і діагональні до структурно-геоморфологічної зональності *скиди* і *накиди*. Формою їхнього

Рис. 5.20. Здвиг тектонічної складки у північному напрямі по лінії субмеридіонального розлому (гори Середньої Азії).

прояву є тектонічні уступи, які розділяють блоки неоднакової геоморфологічної будови, а також ступінчастість рельєфу. Тектонічна (розривна) природа ступінчастості виявляється завдяки прямолінійності уступів, які розділяють блоки з різним ступенем розчленованості або різними типами рельєфу з обидвох сторін від уступу.

Слабо виявляються на знімках порушення із пологими закладаннями зміщувачів *(насуви)*, оскільки їх зрідка успадковує долинна мережа. Однак треба аналізувати не саму поверхню насуву, а весь комплекс принасувних структурних форм. Визначено, що фронтальна частина насувного блоку перетворюється в асиметричну антиклінальну складку, замкова частина якої руйнується першою, внаслідок чого утворюється уступ, паралельний до фронту насуву. Уступ має вигляд пологовигнутої в плані смуги і може бути підкреслений тінями. На знімках виявляється смугоподібний малюнок зображення, що є індикатором насувної структури. Проте виявлення цієї структури потребує узгодження з тектонічними картами, оскільки смугове зображення можуть давати й інші пасивні геологічні структури.

Розривні порушення на космічних знімках виражені у вигляді лінеаментів. *Лінеаменти* (від лат. lineamentum – лінія) – це лінійні елементи зображення, що відповідають на місцевості прямолінійним чи злегка вигнутим об'єктам земної кори, які відображають її різномасштабні, різночасові і різноглибинні неоднорідності. Важливість вивчення лінеаментів полягає в тому, що з ними пов'язують розподіл корисних копалини і сейсмічних явищ на земній поверхні.

Лінеаменти можуть прямо відповідати розломам або бути і непрямим відбиттям похованого розлому і на поверхні не проявлятися. Вони також можуть бути поверхневим "слідом" похованих геологічних контактів, границь і лінійних утворень іншого роду, що не належать до категорії розривних.

Найбільш чітко лінеаменти видимі на інфрачервоних космічних знімках, оскільки в тріщинах і розломах звичайно міститься підвищена кількість вологи, що інтенсивно поглинає випромінювання цього діапазону. На фотографічних і сканерних знімках ознаками інтерпретації лінеаментів є здебільшого лінійні аномалії фототону.

Зображення лінеаментів формується спрямленими ділянками долин і льодовикових трогів, ланцюжками озерних та інших понижень, лініями дренажу підземних і поверхневих вод, різного роду уступами, межами форм і комплексів рельєфу (наприклад, пасмоподібними і рівнинними), особливостями структури ґрунтового і рослинного покриву тощо. Всі особливості і деталі ландшафту закономірно орієнтовані і згруповані в деякі більш-менш вузькі прямолінійні зони, які і є лінеаментами. Кількість компонентів ландшафту і їхня питома вага у формуванні образу лінеамента від місця до місця не залишаються постійними. Ширина таких зон або смуг, якщо йдеться про лінеаменти, змінюється від перших кілометрів до декількох десятків кілометрів. Тому для наземного спостерігача вони найчастіше не очевидні, і для свого виявлення потребують певної картографічної чи фотографічної генералізації.

З урахуванням структурно-геологічної зумовленості головних елементів ландшафту визначаємо геологічну природу і зміст лінеаментів. З цього погляду вони зображені на знімках чітко орієнтованими і приуроченими до деяких прямолінійних ліній або зон структурними елементами (підвищеною тріщинуватістю, розломами, флексурами і складками), а також всіма особливостями геологічного субстрату, які позначаються на структурі ґрунтово-рослинного покриву і рельєфі.

*Класифікації лінеаментів*. Виходячи зі способів реєстрації й особливостей методів вивчення лінеаментів, тобто засобів і способів їхнього виявлення і пізнання загалом або характеристики основної ознаки, за якою виділяється той або інший лінеамент, їх класифікують: гіпсографічні або топографічні лінеаменти (*тополінеаменти*), *батилінеаменти* (для рельєфу морського дна), *морфоструктурні лінеаменти* (тобто проявлені в структурно-геоморфологічних або морфоструктурних особливостях земної поверхні), *ліневенти* (виражені в рельєфі випрямлені елементи завдовжки в сотні метрів – перші кілометри), *геолінеаменти* (виділяють за аналізом малюнка геологічних карт), геофізичні лінеаменти, зокрема, що виділяються за структурою магнітних полів (“*магнітолінеаменти*”), гравітаційних полів (“*гравілінеаменти*”), теплових полів (“*термолінеаменти*”), *сейсмолінеаменти* (за закономірностями просторового положення вогнищ землетрусів), *фотолінеаменти*

(що дешифрують на фотографічних аеро- і космічних знімках), *космолінеаменти* (визначені на будь-яких космічних зображеннях). Ця класифікація відображає, по суті, окремі сторони, форми фізичного прояву лінеаментів і відповідні методи їхнього виявлення і вивчення.

На основі інтерпретації знімків різних масштабів виявили *розміри лінеаментів*. За величиною їх поділяють на: криптолінеаменти (1–10 м), інфралінеаменти (10–100 м), мікролінеаменти (0,1–1 км), мезолінеаменти (1–10 км), макролінеаменти (10–100 км), супралінеаменти (100–1 000 км), мегалінеаменти (1 000–10 000 км), транслінеаменти (більше 10 000 км).

*За протяжністю* лінеаменти поділяють на локальні, регіональні, трансрегіональні (рис. 5.21) і глобальні.

Уживаються також й інші визначення, що характеризують *просторово-генетичні співвідношення лінеаментів з блоками*, зонами, областями, плитами й іншими категоріями структурних елементів

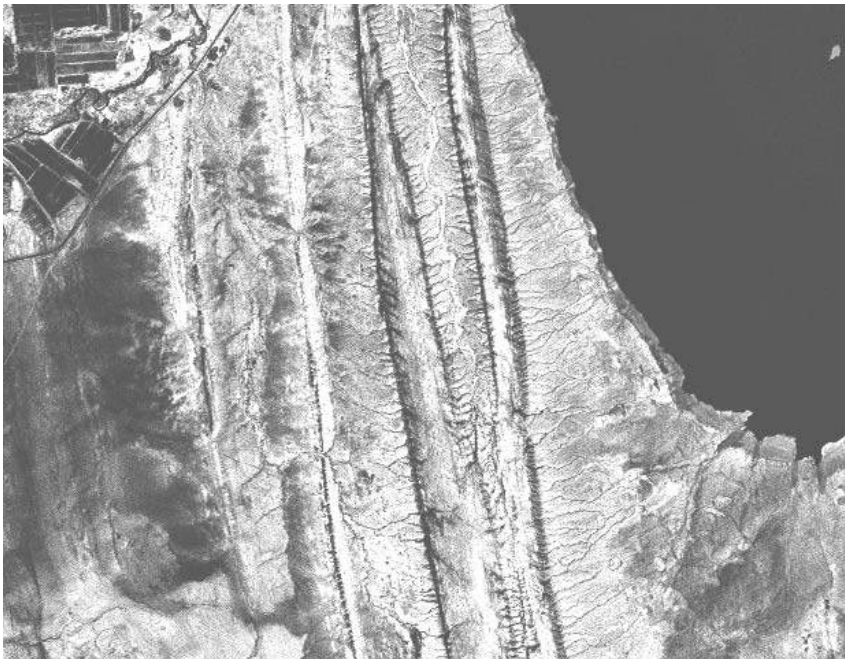


Рис. 5.21. Трансрегіональні лінеаменти на узбережжі Мавританії.

літосфери, в межах яких вони розвиваються або їх обмежують, або транзитні до них. Це, відповідно, внутрішні (внутрішньоблокові, внутрішньоплитові і т.п.), зовнішні або граничні і наскрізні або транзитні лінеаменти (зокрема, трансзональні, трансрегіональні, трансорогенні, трансконтинентальні).

*За глибинністю* закладання в розрізі літосфери лінеаменти поділяють на приповерхневі і глибинні, верхньокорові, нижньокорові або корові, верхньомантійні. Дешифруючи лінеаменти, проявлені на космічних знімках і, отже, на земній поверхні, у всіх випадках йдеться про глибину закладання лінеамента, тобто положення в розрізі літосфери того об'єкта, відбитком якого на поверхні є лінеамент.

Цікаво, що на інтерпретації космознімків глобального і континентального рівнів генералізації виявили системи трансрегіональних лінеаментів (планетарних тріщин), які закономірно орієнтовані та зумовлені планетарними явищами. Їхнє орієнтування проявлене в межах чотирьох азимутів: ортогональна система взаємно перпендикулярних меридіональних і широтних лінеаментів та система діагональних лінеаментів північно-східної (45°) і північно-західної (315°) протяжності. Таке закономірне розміщення тектонічних лінеаментів пов'язують з напругами, що виникають у земній корі у разі змін кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі, яке викликає зміну форми геоїда.

Інтерпретація лінеаментів передбачає застосування комплексних методів їхнього дослідження, зокрема, виявлення на космознімках, систематизацію за певними параметрами і подальше порівняння з відомими геологічними, геофізичними, сейсмічними та іншими матеріалами. Важливим аспектом досліджень є вияснення причин, які сприяють утворенню і розвитку лінеаментів.

***Інтерпретація проявів неотектонічних рухів.*** Зазначимо, що неотектонічними рухами вважають підняття чи опускання земної поверхні, яке відбувалося з різною амплітудою протягом кайнозойської ери. Такі рухи, особливо підняття, на космічних знімках дешифрують за непрямими ознаками, зокрема, за їхніми проявами у рельєфі. Форми рельєфу мають більшу наочність, ніж тектонічна структура, щодо виявлення на знімках ознак неотектонічних рухів. Метрові, а іноді й дециметрові переміщення вздовж активних тектонічних ліній геологічно миттєво відобра-

жені в добре видимих формах рельєфу, тоді як виявлення їх у геологічній структурі складне навіть у разі наземних досліджень.

Ділянки локальних неотектонічних рухів ідентифікують за такими особливостями рельєфу, як специфічні малюнки гідромережі (спрямлення, обтікання, зміщення долин рік); локальні аномалії густоти та глибини розчленування; локальна поява денудаційних поверхонь вирівнювання серед акумулятивних для піднять чи ділянок з ерозійним типом рельєфу серед акумулятивного для опускань; аномальна форма елементів рельєфу, що мають звичайно, "правильні" обриси.

Специфічність малюнка річкової мережі полягає в тому, що у транзитних водотоків, які перетинають локальні підняття, звичайно різко зменшене мандрування, спрямлене русло і звужена долина. Якщо підняття енергійно ростуть, ріки їх обтікають або відбувається латеральне зміщення долин рік, від яких залишаються висохлі русла чи лінійні зниження. Якщо підняття ростуть повільно, то транзитні водотоки встигають у них врізатися, і такі підняття виявляються локальним збільшенням глибин паралельних долин. Це так звані висячі долини. У верхніх частинах рік чи бокових приток скачкоподібно наростають абсолютні висоти, утворюється своєрідний уступ поперек днища долини. Вище уступу ділянка ніби нависає над нижчерозміщеною. Це явище виявляють за допомогою встановлення стереоефекту на стереопарах аерофотознімків.

Надзвичайно наочно на знімках виявляють локальні підняття за аномаліями густоти і глибини ерозійного розчленування. Збільшення густоти розчленування пов'язане зі зміною акумулятивного рельєфу на денудаційний в районі підняття, з виходом на денну поверхню корінних порід, звичайно більш тріщинуватих, ніж пухкі відклади, та зі значною тектонічною роздрібленістю купольних частин антиклінальних піднять, що розвиваються.

Добре виявлені на дистанційних матеріалах локальні площі з більш розробленим ерозійним чи денудаційним рельєфом серед менш розробленого. Такі площі, зазвичай, теж відповідають молодим локальним підняттям.

Активні локальні підняття проявляються в рельєфі також у вигляді аномальної форми елементів рельєфу або їхніх незвичайних просторових поєднань. Це, наприклад, різкі звуження долин

рік до повного зникнення акумулятивних елементів долини, або добре видимі деформації планових обрисів конусів виносу і сухих дельт, які зазвичай мають віялоподібну форму. Іноді через активізоване підняття відбувається зміщення по латералі молодих конусів виносу, які не вкладаються у більш древні конуси. Ділянка, яку при цьому перепилює ріка, відповідає власне підняттю.

Наведені приклади не вичерпують всіх випадків проявів у рельєфі неотектонічних рухів. Їхнє виявлення за допомогою аерокосмічних методів є актуальним для практичних застосувань у геологічних дослідженнях.

***Б. Літологічне дешифрування.*** Літологію порід можна вивчати як наземними, так і дистанційними методами. Літологічна інтерпретація зображень Землі спрямована на вивчення складу, фізичних властивостей, генезису і віку порід. На знімках головними індикаторами інтерпретації літологічної будови території є особливості рельєфу. Форми рельєфу, які утворилися одночасно з накопиченням відкладів, відрізняються значною "консервативністю", часто зберігають характерні обриси та індикаційне значення навіть за досить інтенсивного впливу різних вторинних процесів. Оскільки можливості дешифрування рельєфу на дистанційних матеріалах зумовлені їхнім масштабом, то, відповідно, й інтерпретація геологічних утворень зумовлена масштабом використовуваних знімків. Максимальну інформацію дають аерофотознімки середніх і великих масштабів (1:35 000 і більші), а дещо генералізовану інформацію можна отримати з космознімків та дрібномасштабних аерофотознімків.

На *дрібно- і середньомасштабних космозображеннях* виділені морфоструктури різних порядків інтерпретують формації та літолого-стратиграфічні комплекси гірських порід. У цьому разі можливе відокремлення головних генетичних категорій порід: осадових, магматичних, метаморфічних. Морфоструктурні ознаки відображають різний характер дислокованості порід і дають змогу визначати їхню стійкість щодо звітрювання, що є одним з показників петрографічного складу. За зображенням комплексів екзогенних форм рельєфу на *великомасштабних космознімках і дрібномасштабних аерофотознімках* виділяють літологічні різниці порід у межах великих стратиграфічних підрозділів і в тому числі фаціальні комплекси відкладів. Виділення цього рангу гео-

логічних тіл під час інженерно-геоморфологічного картування чи розчленування товщ порід в інженерних цілях особливо необхідне, зокрема, для вивчення алювіальних, озерних і морських відкладів, склад яких може змінюватися від тонких глинистих до грубоуламкових утворень. Приклади фаціальних комплексів, які дешифрують у цих масштабах, – руслові, заплавні й старичні відклади. Також зазначені масштаби знімків є інформативними щодо інтерпретації корінних порід у відкритих районах. Елементи мезо- і мікрорельєфу на *аерофотознімках середніх і великих* масштабів ідентифікують склад, генетичні типи, фізичні властивості, потужність, вік та умови залягання геологічних утворень. Кожному типу порід відповідає свій мезо- і мікрорельєф, а також малюнок дрібної гідромережі (рис. 5.22). За характерними формами мезо- і мікрорельєфу, який утворився на гірських породах різного складу, у процесі інтерпретації можна виділити окремі їхні літологічні різниці серед інших порід, провести геологічні

Рис. 5.22. Ніздрювата поверхня схилів засвідчує виходи порід на поверхню (аерофотознімок; береги водосховища поблизу смт Бурштин).

межі між ними, а серед осадових порід простежити окремі пласти та їхню протяжність.

Можливість використання геоморфологічних індикаторів для дешифрування порід різного складу (а часто й віку) головно залежить від фізичних властивостей гірських порід. Цими властивостями значно пояснюють характер прояву порід у рельєфі як результат певної вибірковості процесів звітрювання та ерозії. Серед головних властивостей гірських порід, які інтерпретують за формами мезо- і мікрорельєфу, є міцність, водонепроникність, розчинність, тріщинуватість та ін. *Міцність* гірських порід залежить від їхнього мінералогічного складу, зернистості, однорідності, щільності й структури. Чим міцніші породи, тим менше вони піддаються процесам руйнування і тим більша можливість порівняно з менш міцними породами їхньої препарації та відображення в додатних формах рельєфу. Стійкі породи добре читати на аерофотознімках за крутими відкосами чи структурними уступами, а м'які – ідентифікують за пологими частинами схилів.

Для карбонатних, гіпсових, солевмісних порід важливе значення мають їхні *розчинні властивості*, які призводять до карстоутворення і суфозійних просадових явищ. Форми рельєфу, які утворилися на цих породах під впливом зазначених процесів, вдало інтерпретують на знімках такі породи, як вапняки, доломіти, гіпси, леси тощо. Крім того, форми рельєфу залежно від складу відкладів формують на знімках певну структуру зображення: однорідну для важкорозмивних порід, неправильно-смугасту для легкорозмивних глинистих порід і смугасто-сотову для лесових відкладів. Розчинні властивості порід зумовлюють і певний малюнок ерозійної мережі: деревоподібний для глинистих порід, радіальний для лавових покривів, соляних куполів, наявність колиноподібних і гострих вигинів є індикатором карбонатних порід.

Важливу роль відіграють знімки під час інтерпретації *четвертинних відкладів*. Їх дешифрують за прямими і непрямими ознаками. Прямими дешифрувальними ознаками є геометрична форма об'єктів, фототон чи колір. Загальною комплексною ознакою є характерний рисунок фотозображення, що добре проявляється на ділянках розвитку багатьох генетичних типів четвертинних відкладів. Наприклад, за характерним рисунком у межах річкових долин впевнено виділяють русловий і заплавний алювій, в

областях розвитку гірсько-долинного зледеніння – різного типу і віку морени та флювіогляціальні відклади, а в пустельних районах – різного характеру еолові відклади.

Непрямими ознаками дешифрування є геоморфологічні і геоботанічні ознаки. Зокрема, розробляють методику дешифрування й картування генетичних типів відкладів на тлі виділення великих типів рельєфу і його морфологічних форм. Територію розчленовують на типи рельєфу (високогір'я, середні, низькі гори з різним ступенем розчленування; горбисті височини; плоскі рівнини різного розчленування). У їхніх межах картографують форми рельєфу різного генезису (водно-ерозійного, акумулятивного, ерозійно-льодовикового, структурно-тектонічного та іншого походження). З урахуванням цих геоморфологічних умов виділяють елювіальні, делювіальні, гравітаційні, пролювіальні, алювіальні, гляціальні та інші відклади.

Геоботанічні непрямі ознаки під час інтерпретації різних типів четвертинних відкладів враховують загальні фізико-географічні умови й особливо кліматичну поясну зональність у розподілі рослинних угруповань. З урахуванням цих чинників ґрунтовий покрив і рослинність, що розвивається на поверхні четвертинних відкладів, часто індукує особливості речовинного складу і фізичного стану пухких відкладів. В освоєних районах враховують особливості сільськогосподарського використання територій, складених різними типами і складом четвертинними відкладами, а також розміщення і будову населених пунктів, дорожної мережі, кар'єрів, меліоративних, іригаційних та інших інженерних споруд.

Інтерпретація четвертинних відкладів охоплює: визначення границь їхнього поширення; генезису виділених четвертинних відкладів; відносного віку четвертинних відкладів; складу відкладів; практичне значення виділених четвертинних відкладів з погляду пошуків корисних копалин, будівельних матеріалів, інженерних споруд та ін.

На відкритих (частково задернованих) ділянках аерофотозображення дають змогу картографувати *умови залягання* гірських порід. Визначення особливостей залягання порід дистанційними методами відрізняється від польових вимірювань (наприклад, гірським компасом) тим, що охоплює значну площу виходів плас-

Рис. 5.23. Горизонтальне залягання пластів порід у Великому каньйоні (США). (Комп'ютерна елевація космознімка; в нижній частині видно лінії, що нагадують горизонталі, і свідчать про характер залягання порід).

тів на поверхню землі й характеризує певну частину структури. Породи, які залягають горизонтально, утворюють у рельєфі характерні уступи, що окреслюють схили на одному гіпсометричному рівні, нагадуючи на знімках горизонталі (рис. 5.23).

У випадку вертикального залягання пластів найстійкіші породи виступають на поверхні у вигляді броньованих поверхонь додатних форм чи скелястих пасом. На аерофотознімках вони мають лінію, що узгоджена з простяганням порід і проходить незалежно від форм рельєфу. За нахиленого (моноклінального) залягання пластів у рельєфі формується уступ у вигляді пластового "трикутника": пласти вигнуті так, що кут, утворений вигином в найнижчій точці рельєфу (в долинах), направлений вздовж падіння пластів, а в найбільш високій (на вододілі) – за їхнім підняттям (рис. 5.24). Як показують знімки, плавні вододіли, широкі долини і невеликі перевищення рельєфу утворюють широкі пластові трикутники (мають форму трапецій, напівовалів). Розчленований крутий рельєф формує часті з різкими вигинами пластові трикутники.

Рис. 5.24. Пластові "трикутники" як індикатори нахиленого залягання порід (комп'ютерна візуалізація Анд в Аргентині).

Під час дешифрування четвертинних відкладів на аерофотознімках можна визначати їхню *потужність і відносний вік*. Потужність відкладів з'ясовують за виходами чи просвічуванням підстильного субстрату, а відносний вік – за положенням їх у рельєфі, морфологією й ступенем ерозійного перетворення форм рельєфу.

## 5.3. Інтерпретація типів рельєфу і морфодинамічних процесів

Найбільш успішно аерофото- і космічну інформацію використовують під час вивчення рельєфу Землі. Це пов'язують з тим, що спостереження стереомоделей рельєфу досліджуваної

території, по суті, не залежить від яких-небудь теоретичних уявлень. Зокрема, всі дослідники бачать рельєф на стереомоделях однаково, лише з різним ступенем детальності. Ще однією умовою успішного дешифрування рельєфу є те, що він належить до об'єктів земної поверхні, які зумовлюють вигляд космічного зображення. Навіть невеликі зміни у висоті рельєфу, ступені й характері його розчленування помітно відбиваються на його інтегральних оптичних властивостях і фіксуються на знімках. Добру фотогенічність рельєфу на знімках пов'язують зі значними відмінами і спеціалізованістю природних ландшафтів, які мають індивідуальні оптичні характеристики. Крім того, виразність рельєфу підкреслена на знімках тінями. Під час низького стояння сонця тіні читають навіть незначні деталі ерозійної мережі, малозамітні пасма та уступи.

Під час використання радіолокаційних вимірювальних систем рельєф є головним вимірювальним параметром. Оскільки локацію виконують під кутом до горизонту, довгі тіні підкреслюють деталі рельєфу. В цьому випадку радіолокаційні знімки можна зіставити з фотознімками, знятими під час низького стояння сонця. При цьому важливо, що сантиметрове випромінювання радарів, на відміну від мікрометрового фотографічного і сканерного знімання, слабо розсіюється в атмосфері, і тому рельєф проявляється під час радарного знімання найбільш чітко.

Підвищена цікавість до вивчення рельєфу на знімках пов'язана з тим, що він є індикатором багатьох об'єктів, зокрема, геологічних, геоботанічних, гідрологічних умов та антропогенного використання земель.

Вивчення рельєфу виконують на чорно-білих панхроматичних аерофотознімках, особливо коли наявні стереопари цих знімків і виникає можливість встановити стереоефект і спостерігати об'ємну його модель. Кольорові фото- і сканерні знімки є суттєвим доповненням до чорно-білих. Більш інформативними виступають знімки, зняті в зеленій зоні. Детальний морфометричний аналіз доцільно виконувати за радіолокаційними знімками, особливо знятими при невеликому куті локації. Їм властива висока виразність передачі рельєфу. Радарні знімки дають змогу іноді простежувати рельєф, похований під пухкими відкладами невеликої потужності.

Важливе значення під час інтерпретації рельєфу має масштаб знімків. Аерофотознімки та космічні знімки великих масштабів дають змогу виявляти елементи і форми рельєфу кількаметрової величини. Тому на дешифруванні таких знімків виявляють дрібні ерозійні, мерзлотні форми, карстові западини, піщані брижі та інші мікроформи рельєфу. Мікроформи височин та гір більш виразно відображаються на знімках, ніж форми рівнинного рельєфу. Їхній інтерпретації сприяє також встановлення стереоефекту і змога спостерігати рельєф як об'ємне тіло.

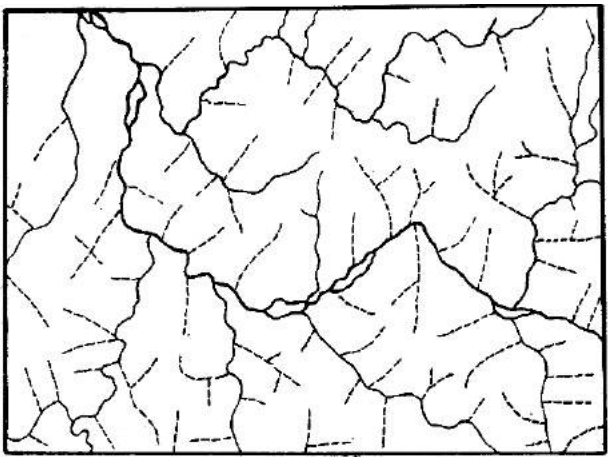
Дрібний масштаб знімків, зазвичай, не дає змогу розпізнавати окремі форми рельєфу. Проте виявлення їхніх поєднань, які займають значні площі, стає цілком можливим. Отже, можна виділяти райони інтенсивно розчленовані великою кількістю вимоїн, ярів, ділянки розповсюдження суфозійних западин або карстових форм. Велика оглядовість дрібних знімків дає змогу дешифрувати великі форми рельєфу, яким властива значна лінійна протяжність, – долини, гірські хребти, берегові форми і т.п. Крім того, космічні знімки значно полегшують виділення типів і комплексів рельєфу. Вони є незамінними під час геоморфологічного районування території.

Інтерпретацію рельєфу розглядаємо у таких аспектах:

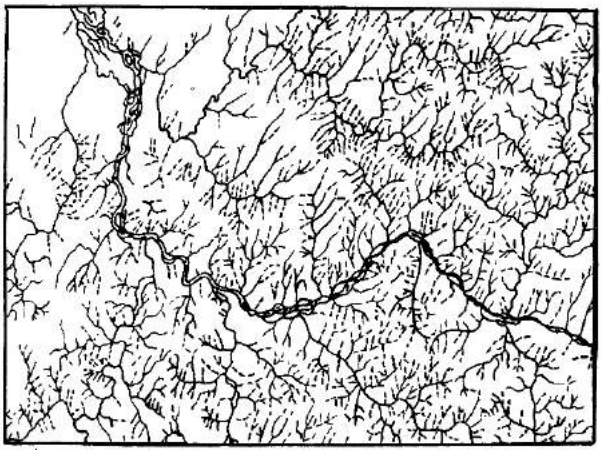
- дешифрування морфологічних і морфометричних його характеристик;
- інтерпретація генетичних типів рельєфу;
- виявлення та картографування морфодинамічних процесів.

### *5.3.1. Дешифрування морфологічних і морфометричних характеристик рельєфу*

Велику інформативність мають аерофото- і космознімки під час вивчення *густоти розчленування* території. Для оцінки густоти розчленування використовують коефіцієнт розчленованості території – довжину ерозійних врізів, що припадають на одиницю площі. Чим більший масштаб, тим дрібніші ерозійні врізи враховують у разі його обчислення. Картографічні джерела часто дають узагальнену інформацію або пропускають більшість дрібних ерозійних форм. Інформативність знімків порівняно з картами підвищується зі зменшенням



*а*



*б*

Рис. 5.25. Малі долинні та ерозійні форми:
*а* – за топографічною картою, *б* – за космознімком того ж масштабу [99].

розмірів цих форм (рис. 5.25). Вони містять повну інформацію про довжину, частоту розміщення, звивистість і морфологію ерозійних форм різних порядків. Тому такі показники, як визначення порядків долин, ширини заплави, довжини тальвегів ерозійних форм та віддаленість вершин вододілів від найближчих тальвегів, доцільно обчислювати за аерофотозображеннями. Ці показники

використовують під час складання карт ерозійного розчленування рельєфу, розвитку ярково-балкової мережі, еродованості ґрунтів, селевих та лавинних процесів. Густоту розчленування території визначають на середньо- і великомасштабних космо- та аерофотознімках залежно від площі досліджуваної території.

Інформативними є космічні та аерофотознімки щодо відображення такого показника, як *малюнок гідромережі*. Малюнок гідромережі – достовірний індикатор морфології та генезису сучасного рельєфу, тектоніки й неотектоніки, типу й інтенсивності поверхневого стоку. Визначають такі типи малюнка ерозійної мережі: деревоподібний, перистий, ґратчастий, паралельний, радіальний, відцентровий, змішаний. Малюнки гідромережі часто є структурно-обумовленими. Так, радіальний чи відцентровий малюнок свідчить про наявність купольної структури, яку обтікають або від якої розходяться долинні форми. Гратчастий малюнок формують долини, закладені по тріщинуватих породах (див. рис.), паралельний утворюють долини між вузькими гірськими хребтами. Малюнки гідромережі є також літологічно обумовленими. Зокрема, деревоподібний малюнок мають долини у більш податливих породах, перистий – у більш міцних. Особливості гідромережі найчіткіше простежуються на космознімках регіонального й локального рівнів генералізації та аерофотознімках. Зі збільшенням масштабу приблизно втричі детальність вивчення ерозійної мережі, за даними С.А. Сладкопєвцева, збільшується на один порядок.

Аерофото- і космічні зображення дають змогу вивчати *типи розчленування* рельєфу. Особливо це стосується глибоко й різко розчленованого рельєфу. Навіть на ділянках найбільшого згущення горизонталей гострі й скелясті межиріччя читають на картах як овальні, а вузькі V-подібні долини сприймають як коритоподібні. На знімках, особливо у випадку стереоефекту, такі умови дешифрують досить чітко, зокрема, добре виявлені вузькі відроги хребтів між притоками, що близько сходяться; прямолінійні схили; конусоподібні гребені хребтів, ущелиноподібні долини.

За дистанційними зображеннями також вивчають переходи між різними морфологічними і генетичними типами рельєфу, наприклад, між пасмово-долинними і горбисто-долинними, структурно-денідаційними і акумулятивно-терасованими. Добре видно

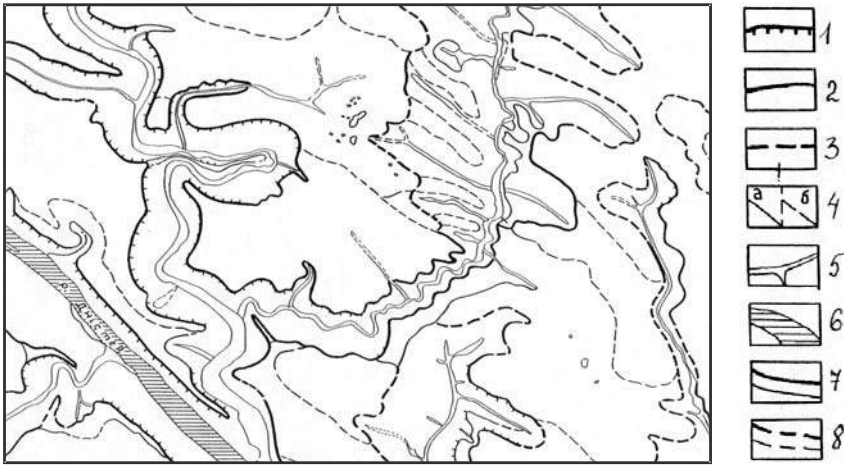
переходи між формами рельєфу: зміни трогових долин ерозійними чи переходи від поверхні вирівнювання до крутих схилів. Такі перехідні морфологічні зони дешифрують завдяки тонкій реакції фототону на природні зміни, чого позбавлені топокарти.

Аерофотознімки та великомасштабні космознімки успішно застосовують для оцінки *типів розчленування елементарних поверхонь* – яркового, вимоїнного, лощинного. На знімках добре видно яркову мережу, дрібні вимоїни на полях і вздовж доріг, горбкуватість елементів рельєфу, зумовлену генетичними чинниками. Аналіз типів розчленування з використанням дистанційних матеріалів беруть до уваги під час складання прогнозних та генетичних карт різних видів, а також морфоскульптурного районування.

У разі морфологічних досліджень рельєфу обчислюють *кути нахилів та експозицій схилів*, що можна виконувати із застосуванням дистанційних зображень. Кути нахилу схилів тісно пов'язані з густотою і глибиною розчленування, оскільки схили можуть бути близькими за крутістю для різних показників глибини й густоти розчленування. Використання знімків є ефективним за умов сильно розчленованого рельєфу з різкими перегинами схилів. Вони дають більше додаткового матеріалу порівняно з картами щодо розподілу кутів, проведення меж схилів різної орієнтації, районування території за категорією переважання певних ухилів.

В основі низки морфологічних карт (густоти, глибини розчленування) є поділ території на рівновеликі квадрати й зачислення до них параметрів, які вимірюють. За значної об'єктивності ця методика часто призводить до невідповідності меж морфометричних і геоморфологічних карт. Уникнути таких суперечностей можна врахуванням природних геоморфологічних меж, які проводять, з використанням аерофото- і космозображень.

Розроблена також спеціальна методика визначення *відносних висот (перевищень висот)* за аерофотознімками. Перевищення висот відшукують як перевищення вершин додатних над днищами від'ємних форм щодо вершин додатних форм. Цей показник визначають за зміщенням точок стереопар аерофотознімків і обчислюють за формулами. Показник перевищень висот враховують як чинник впливу на ерозійні процеси та для розробки заходів боротьби з ерозією.




а

*б*

Рис. 5.26. Каркасні лінії рельєфу, віддешифровані під час отримання стереоефекту на стереопарах знімків (Подільське Придністер’я): а – морфологічна картосхема, б – аерофотознімок 1:36 000. Каркасні лінії рельєфу на схемі: 1 – брівки вершин, 2 – виразні межі вершинних поверхонь, 3 – поступові межі, 4 – перегини схилів: *а* – чіткі, *б* – нечіткі, 5 – межі днищ долин, 6 – русло ріки, 7 – лінії, що впевнено дешифруються, 8 – передбачувані лінії.

Дешифрування морфології рельєфу передбачає також виділення його *каркасних ліній*, які видимі на об'ємній моделі рельєфу під час утворення стереоефекту з використанням стереоприладів (рис. 5.26). Ці лінії не є чітко прив'язаними до горизонтального через однакові проміжки "знімання" форм рельєфу, як це відбувається в разі стереорисування способом горизонталей, а відтворюють його характерні перегини. Каркасні лінії наносять на прозору кальку, розміщену на одному з пар аерофотознімків під час безпосереднього спостерігання під стереоскопом чи стереопроектором.

Перегини рельєфу формуються в результаті напрямленої дії денудаційних процесів на неоднорідні за складом чи структурою шари порід та ґрунту. Податливіші породи, які руйнуються швидше, утворюють на схилах виїмки, заглибини, схили в цьому разі пологіші, перегини поступові. Стійкі породи мають вигляд уступів або формують урвища, схили крутіші, перегини різкі. У випадку дешифрування і подальшого картографування каркасних ліній передають власне характер морфології схилів – чи це прості прямі схили, чи ускладнені одним або кількома перегинами.

Крім перегинів, каркасними лініями рельєфу виступають також межі вершинних поверхонь та межі днищ долин (тилові шви). Зображаючи їх, передають характерні форми та розміри вершин чи долин, ускладненість мікроформами.

Загалом *морфологічні особливості* рельєфу дешифрують на аерофото- і космічних знімках регіонального та локального рівнів генералізації. Важливу роль під час морфологічного дешифрування відіграють прямі ознаки, такі як форма, розміри, фототон за стереоскопічного бачення, структура й текстура зображення під час моноклінального розглядання (наприклад, через лупу). Форми рельєфу та експозиції схилів можна простежувати також за тінями, що падають. Це, зокрема, полегшує інтерпретацію форм рельєфу в умовах рівнинної місцевості, які іноді важко розпізнати навіть під стереоскопом.

### *5.3.2. Інтерпретація генетичних типів рельєфу*

*Флювіальний рельєф*. Первинні флювіальні процеси можуть створювати на схилах такі форми рельєфу, як дрібні улоговини стоку, потяжини, вимоїни, борозни. Їх дешифрують на аерофотознімках і космознімках великих мас-

Рис. 5.27. Первинні флювіальні форми
на аерофотознімку (Рівненське плато):
1 – дрібні улоговини стоку, 2 – потяжини, 3 – вимоїни, 4 – борозни, 5 – яр.

штабів. Для улоговин стоку характерна лінійно-витягнута уздовж схилу форма і досить світлий фототон завдяки інтенсивному зносу по них матеріалу. Невеликі вимоїни і борозни мають на знімках своєрідний малюнок, який складається з двох лінійно витягнутих смуг дуже світлого і темно-сірого, майже чорного, кольору з різкою межею між ними. Світлі смуги відповідають освітленому борту борозни, темні – затемненому. Світлий фототон характерний для первинних флювіальних форм, закладених у корінних породах. У пухких породах їхній фототон часто темний, оскільки днища перезволожені (рис. 5.27).

Тимчасові водотоки, які змивають зі схилів пухкі відклади, зумовлюють утворення біля підніжжя схилів конусів винесення, псевдотерас, шлейфів. Конуси винесення легко дешифрують за їхньою характерною, близькою до трикутника формою, зазвичай, світлому фототону і розташуванню в гирлах тимчасових водотоків. Часто можна розрізняти активні конуси винесення і сталі утворення, зростання яких припинилося. Поверхня конусів винесення, що діють, порізана мережею тимчасових русел, деревної рослинності, зазвичай, немає. Старі конуси мають здебільшого темніший фототон, малюнок тимчасових русел на них вже не є

видимим, на поверхні розвивається рослинність у вигляді темних губчастих плям.

Під час розвитку конусів винесення в долинах річок можуть утворюватися псевдотераси. Вони виникають у разі підрізування або прорізання конусу винесення долиною річки. Їх дешифрують за непрямими ознаками: помітним збільшенням відносної висоти тераси над урізанням річки, взаємним розташуванням гирла тимчасового водотоку і долини річки, зміною фототону поверхні тераси – конус винесення зазвичай значно світліший.

Складовими елементами флювіального рельєфу є такі форми, як річкові долини, яри, балки, улоговини стоку, які формують у своїй сукупності долинно-балкову мережу.

Для ярів, балок, долин, улоговин головною ознакою дешифрування є фототон зображення і їхня лінійно-витягнута, часто розгалужена форма. Фототон зазвичай дає цілу гаму сірих відтінків, плавно перехідних один в інший. Тіні мають суттєве значення під час дешифрування таких форм, як яри, борозни і великі вимоїни. У цьому випадку вони дуже різкі і добре підкреслюють глибину та форму об'єктів.

Під час дешифрування ерозійних форм велике значення мають непрямі ознаки передусім геоботанічні. Якщо ці форми не прорізають корінні породи, для них характерний порівняно темніший фототон. Це пов'язують з тим, що в пониженнях завдяки більшому зволоженню створені сприятливі умови для зростання рослинності.

Річкові долини легко розпізнають на знімках за їхньою характерною формою, яка розгалужується, і наявністю русла, якому, зазвичай, відповідає темний, майже чорний фототон. Зазначимо, що чиста глибока вода відображається темними відтінками фототону, тоді як мутна – світлими. На аерофотознімках можуть бути віддешифровані річкові долини таких типів:

1) ущелиноподібні долини, ущелини добре пізнаються за тінями від крутих урвистих берегів. Часто перешкодою під час дешифрування є падаючі тіні від високих берегів, що закривають дно долини;

2) V–подібні долини легко визначають за тінями, що мають різкі межі в руслах, за відсутністю заплави, а також за великою строкатістю знімків з безліччю голих ділянок і різко виражених

скульптурних форм. Верхня межа тіні для V–подібних долин відповідає гребеням гір, а нижня – найчастіше проходить дном долини. Тому під час вивчення знімка особливо важливо визначити верхні і нижні межі тіней, оскільки без цього можна прийняти русла за вододіли, і навпаки. Аерофотознімок при цьому треба розташувати правильно по відношенню до джерела світла. Головною ознакою вершини є сходження верхніх меж тіней в одній крапці;

3) коритоподібні долини (троги) – зазвичай широкі, стереоскопічно простежуються плечі трога. Заплава у цих долинах розвинена слабо або її взагалі немає;

4) ящикоподібні долини мають широке дно, зайняте заплавою з характерною для неї вологолюбною рослинністю і слідами діяльності річки (стариці, віяла блукання і т. п.).

Річкові тераси – одні з характерних елементів долинного морфологічного комплексу. На знімках їх виділяють за уступами, дуговими вигинами, які свідчать про меандрування головного русла та його рукавів (рис. 5.28). Непрямою ознакою границі між заплавою та терасою є наявність на терасі ріллі, сіножатей, оскільки тут

Рис. 5.28. Уступ першої надзаплавної тераси
р. Дніпра в районі Запоріжжя.

глибше залягають ґрунтові води і поверхня менш перезволожена. Під час вивчення терас велику допомогу надає стереоскопічне вивчення аерофотознімків. При цьому можливо визначити кількість ярусів терас і прослідкувати розповсюдження кожного терасного рівня. Визначають також ступінь збереження кожного із визначених рівнів, їхню відносну висоту над урізом ріки.

Для періодично затоплюваної частини днища долини – заплави, зазвичай, можливо отримати за аерофотознімками відомості про характер її розташування щодо русла річки, її ширину, висоту над урізом, розміри і режим розливів. Заплави часто бувають замасковані лучною або чагарниковою рослинністю і заболочені. Тон поверхні лучної заплави здебільшого одноманітний, сірий. У міру збільшення пересіченості поверхні заплави малюнок її набуває на знімку великої строкатості. Наявність западин і зволожених понижень простежується у вигляді плям темнішого фототону, ніж загальний тон заплави. Часто відбувається характерне чергування світлих і темних смуг, що мають віялоподібне розташування. Це "віяла блукання річки" (рис. 5.29). Вони являють собою гривистий рельєф, у якому чергуються заболочені чи заповнені водою

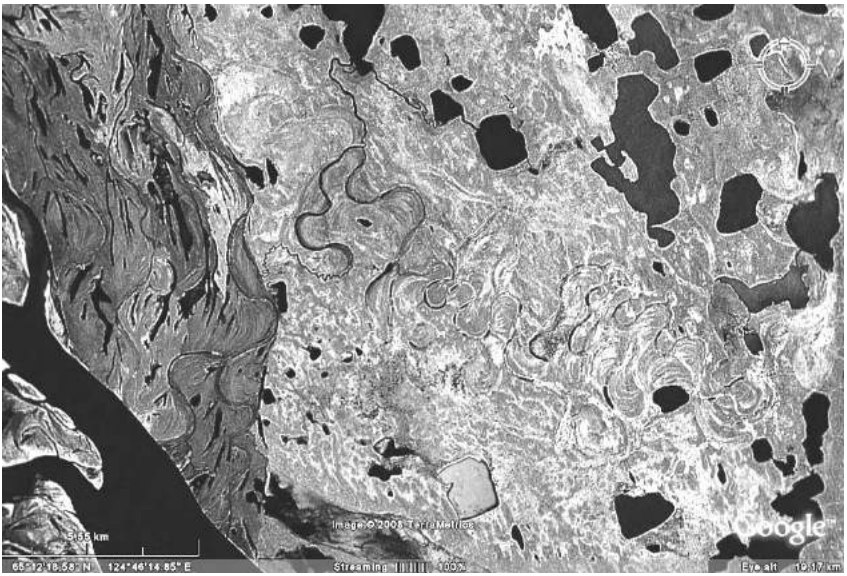



Рис. 5.29. Русло та заплава р. Лєни (Росія) з "віялами блукання".

старичні зниження і міжстаричні підвищення, які повторюють вигини русла ріки.

У тих випадках, коли заплава вкрита лісом, її дешифрування утруднене. При цьому найбільш надійні результати дає стереоскопічне вивчення аерофотознімків. Чагарники на заплаві виявляються у вигляді темних плям округлих контурів, що мають губчасту структуру малюнка.

Ознакою заболоченості заплави є наявність на її поверхні плям або смуг світло-сірого тону з характерною (ніби змитою) зернистістю малюнка. Для ясно виражених і добре розроблених долин в освоєних районах межа заплави приблизно може бути встановлена як лінія, що розділяє поверхню з одноманітним сірим тоном, і площі, що мають на знімку вигляд строкатої мозаїки відповідно до схилів долини.

На поверхні першої надзаплавної тераси дешифрують перезволожені чи заболочені стариці, зображення яких має вигляд темних смуг. Крім того, спостерігають темні округлі плями, що відповідають озерам, пониженням, западинам. Добре читається брівка першої надзаплавної тераси у вигляді лінії, що обмежує поверхню. Часто на першій надзаплавній терасі буває розвинена деревна рослинність, що дає на знімку сірий фототон зернистої структури. Також тут часто розташовані поля, присадибні ділянки, які вказують на наявність кращих ґрунтів в умовах надзаплавної тераси, порівняно із перезволоженими ґрунтами заплави. Тераси вищих рівнів дешифрують стереоскопічно за їхньою порівняно рівною поверхнею. Брівка і сліди діяльності річки в їхніх межах виражені менше.

***Льодовиковий рельєф***

За своїм типом і місцеположенням льодовикові форми і типи рельєфу можуть бути розділені на дві категорії:

1) рельєф районів гірського зледеніння;
2) рельєф районів покривного зледеніння.

*Рельєф районів гірського зледеніння.* У цих районах можуть бути віддешифровані такі об'єкти: форми рельєфу в області розвитку льодовиків, шляхи і форми зносу моренного матеріалу та його розподіл.

На фоні дуже світлих плям сучасних льодовиків і сніжників за темним фототоном, різкими контурами і падаючими тіня-

Рис. 5.30. Гірський альпійський рельєф
на перспективному аерофотознімку:
1 – карлінги, 2 – кари.

ми дешифрують карлінги, вершини гір, скелясті гребені хребтів (рис. 5.30). Різкі форми рельєфу добре розпізнають на знімках завдяки своїм формам (для карлінгів характерні пірамідальні) і чіткому перепаду світла і тіні, який вони створюють. У разі стереоскопічного розглядання "височать" піки, гребені, скелі і скелясті уступи, які виділяються серед навколишньої поверхні різкими й зубчастими обрисами.

На космознімках дешифрують області живлення льодовиків та ділянки, де вони спускаються в долини, утворюючи своєрідні "льодовикові язики". На поверхні і краях льодовиків добре видно темні поздовжні смуги, що відповідають серединним і бічним моренам, а також тріщинам, заповненим моренним матеріалом. На передньому краї льодовикового язика півкруглими валами фіксують кінцевоморенні вали (рис. 5.31). Відступаючі льодовики

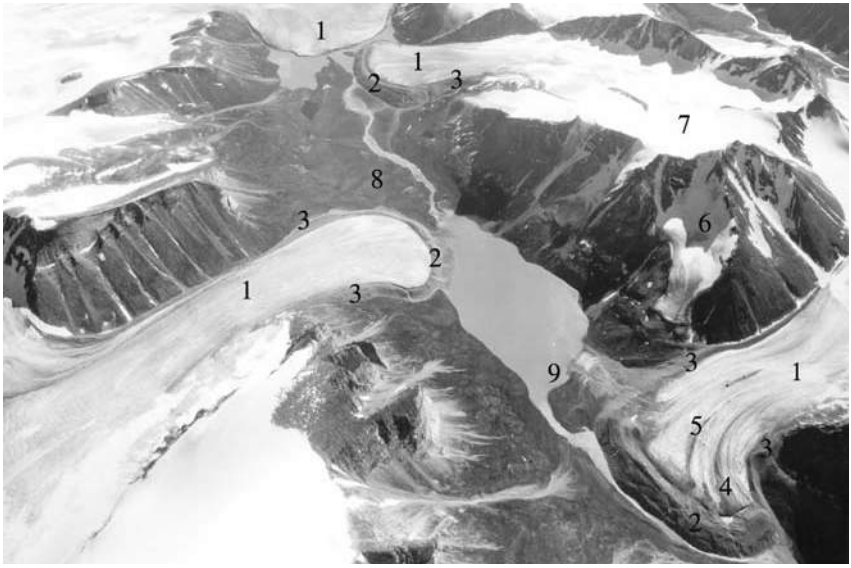



Рис. 5.31. Рельєф гірського зледеніння
(перспективний аерофотознімок Кордільєрів Канади):
1 – льодовикові "язики", 2 – кінцеві морени, 3 – бокові морени,
4 – серединна морена, 5 – тріщини у льодовиковому потоці,
6 – кари, 7 – льодовикові цирки, 8 – трогова долина,
9 – підпруджене мореною озеро.

залишають кілька кінцевоморенних пасм. Тоді як в наступаючих льодовиків кінцеві морени мають кількарівневу будову і добре виражений вал. Нерідко моренні утворення перепиляні борознами, по яких стікають льодовикові води. Потужність морен вказує на інтенсивність денудації, перевагу більш пухких чи міцних порід, що складають схили гірських масивів.

На знімках гірських районів дуже добре дешифрують також сліди давнього зледеніння. Вони встановлюються за комплексом характерних льодовикових форм рельєфу, що дають змогу визначати тип зледеніння, його інтенсивність і межі. Особливо добре дешифрують льодовикову кору за її підковоподібною формою, льодовикові трогові долини з моренними валами, що часто мають вид ланцюжків горбів, які відповідають серединній морені. На дні трогів виявляють безліч темних плям, якими відобразилися озера і заболочені пониження. Трогові долини відділяють від долин флю-

Рис. 5.32. Трогова льодовикова долина на перспективному аерофотознімку (Канада).

віального походження за їхніми відшліфованими придолинними схилами, чіткими перегинами між придолинними, пологішими, і привершинними, більш крутими, схилами (рис. 5.32). Іноді в цих місцях наявний уступ – плече трога.

Дещо менш виразно дешифрують форми рельєфу, приурочені до воднольодовикових відкладів. Вони мають широкі шлейфи на зовнішній стороні кінцевих морен. У їх межах часто утворюються яри з характерним лапчастим малюнком, еолові форми у вигляді дюн, піщаних горбів. Серед них часто спостерігаються плями незакріплених пісків світлого фототону.

*Рельєф районів покривного зледеніння.* В області четвертинного покривного зледеніння розрізняють центральні і периферійні частини.

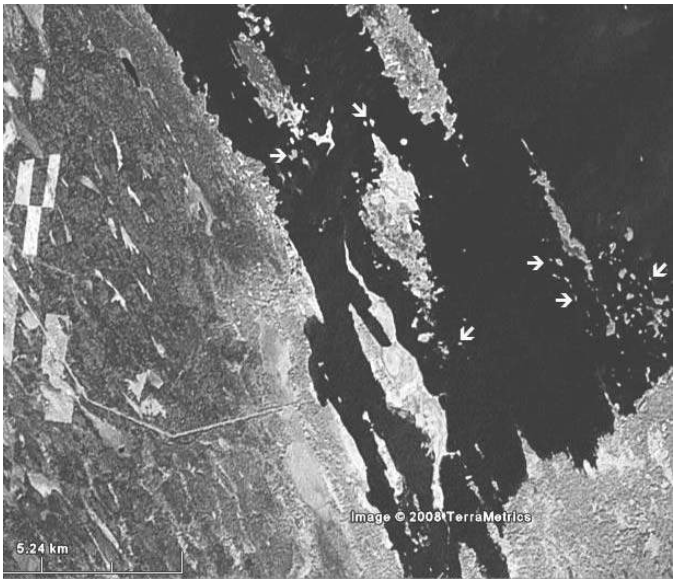
Центральні частини, де льодовик тримався довше і досягав найбільшої потужності, піддалися найбільшій його екзараційній дії. Найкраще виражені сліди екзарації в межах розчленованого височинного рельєфу (рис. 5.33). Льодовик певним чином шліфує пагорби, виорює малі долинні форми, чим зумовлює

Рис. 5.33. Сліди екзараційної діяльності льодовика у вигляді відточених в одному напрямі схилів (аерофотознімок території Канади).

впорядкування форм в одному напрямі. На знімках борозни від руху льодовика виявляють за паралельними лініями та смугами темного фототону. Видовженими в напрямі руху льодовика є не тільки окремі форми, а й комплекси форм, які створюють своєрідні видовжені геоморфологічні ландшафти, а на знімках мають смугастоподібну текстуру зображення.

Форми плейстоценової льодовикової екзарації зберігаються до теперішнього часу досить добре також і у рівнинних районах. У цих районах ніде не видно скелястих гострих виступів. Часто трапляються округлі згладжені льодовиком горби – "баранячі лоби". У них розрізняється полога, гладко відшліфована напірна сторона і протилежна – крутіша і нерівна, із слідами виламування льодом глиб породи. На космознімках вони розпізнаються слабо, лише у випадку, коли "баранячі лоби" підносяться над водою, вони створюють характерну зернистість на фоні однорідного зображення водної поверхні (рис. 5.34). На аерофотознімках основними дешифрувальними ознаками "баранячих лобів" є тіні і форма об'єктів. Для напірної сторони характерні тіні світлішого тону і м'яких контурів з їх поступовим потемнінням.

*а*




*б*

Рис. 5.34. "Баранячі лоби":
*а* – вигляд на місцевості, *б* – вигляд на космознімку
(Карелія, Росія. Білими стрілками показано місця їхніх скупчень).

Протилежна сторона пізнається за різкими темними тінями. Форма цих горбів в плані зазвичай округла або близька до еліпсоїдної. Масовий розвиток "баранячих лобів" створює своєрідний геоморфологічний ландшафт, званий "кучеряві скелі".

Для центральних областей покривного зледеніння характерна велика кількість озер, що мають складну, надзвичайно розчленовану берегову лінію і неправильні загальні контури. Спостерігають витягнутість озер у напрямі руху льодовика. Більшість озерних ванн зобов'язана своїм походженням виорюючій дії льодовика. Озерні западини замкнуті скелястими берегами, а на їхній поверхні спостерігаються затоплені "баранячі лоби" у вигляді світлих чітко обмежених плям на темному фоні дзеркала води. Для річкової мережі цих районів характерні неглибокі і відкриті долини.

Для периферійної зони четвертинного зледеніння характерне зменшення екзараційної здатності льоду, унаслідок меншої потужності льодовикового покриву, нетривалості залягання і перевантаженості принесеним уламковим матеріалом.

Для цієї зони зледеніння характерна акумулятивна діяльність льодовика. В результаті цього виник горбистоморенний рельєф, що складається з безлічі безладно розташованих великих і малих горбів. Безстічні западини між ними зайняті озерами і болотами. Горби часто утворюють вали і гряди.

Аерофотознімки надають неоціниму допомогу при вивченні моренних ландшафтів.

*Моренні горби і гряди*, які залишилися після відступу льодовика, виділяють на знімках за їхньою компактною формою (рис. 5.35). Використовують, головно, непрямі ознаки дешифрування – біогенні і антропогенні.

Досить часто на моренних горбах розташовані ялинові ліси, які розпізнаються на знімках за конусовидною формою тіней крон дерев і дрібнозернистою структурою поверхнею лісу темно-сірого фототону.

До моренних горбів часто приурочені населені пункти і пасовища, що створюють на знімках строкатий мозаїчний малюнок.

Серед моренних горбів і пасм часто розташовані озерні рівнини, що виникли при спуску льодовикових озер. Вони мають плоску поверхню з рідкісними вузькими долинами річок і їх дешифрують за рівним світлим фототоном і розташуванням серед моренних горбів.

Рис. 5.35. Морений геоморфологічний ландшафт північно-східної Канади.

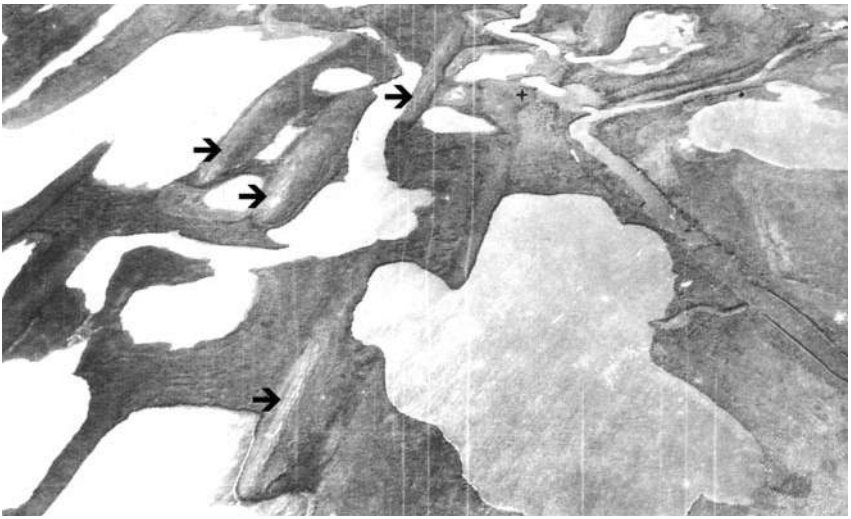


Рис. 5.36. Друмлінно-озерний післяльодовиковий ландшафт (перспективний аерофотознімок території Канади). Стрілками позначено друмліни.

*Друмліни* пізнають за їхньою витягнутою формою, чітким орієнтуванням в одному напрямі і тінями (рис. 5.36). В їхній основі часто залягають корінні породи, які стали причиною осадження на них моренного матеріалу. Вони також формуються акумуляцією морени по тріщинах льодовика. Друмліни видовжені в напрямі руху льодовика і мають більш круті схили зі сторони його руху. Найбільше трапляються на територіях поблизу центрів плейстоценових зледенінь (Канада, Естонія, Північний захід Росії).

*Ози і ками* дешифрують за характерною формою, плямистою структурою фотозображення, тінями. Ози мають на знімках вид довгих вузьких пасм, що нагадують насипи і добре є видимими стереоскопічно (рис. 5.37). Вони утворилися осадженням моренного матеріалу, що знаходився у тріщинах льодовика, під час його танення. У склад озів входить перемитий моренний матеріал, чим відрізняє їх від навіяних валоподібних утворень еолового походження.

Ками є розширенням озів. Вони мають плоскі вершини, округлоподібні форми. Утворилися акумуляцією морен в западинах

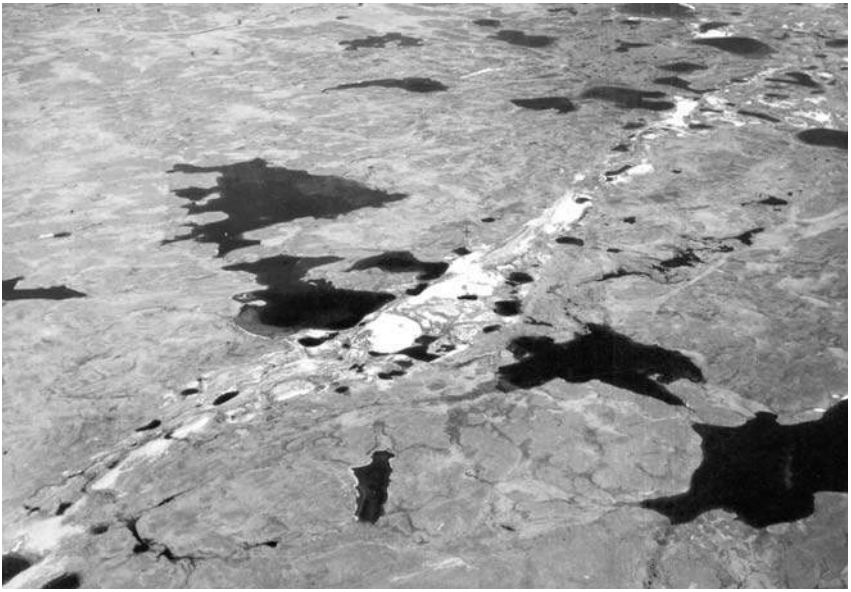


Рис. 5.37. Оз у тундрі Канади
(перспективний аерофотознімок, білуватим фототоном виділились незадерновані піщані відклади на поверхні оза).

льодовика. Ками часто розорані, і в цьому випадку їх пізнають за строкатою структурою фотозображення. У деяких випадках вони зайняті сосновими лісами, що дають на знімку грубозернистий малюнок світлого тону.

За межами акумулятивної зони покривного зледеніння розташовується *область розповсюдження воднольодовикових відкладів*. Форми рельєфу тут зобов'язані своїм походженням діяльності талих льодовикових вод. Значне поширення мають зандрові рівнини з плоскохвилястою поверхнею. Їх дешифрують на знімках за світлим фототоном з дрібноплямистим малюнком і за приуроченістю до них соснових лісів. На них, зазвичай, немає ріллі. Під час стереоскопічного вивчення розпізнають еолові форми рельєфу у вигляді пірамідальних дюн, горбів, а також світлі ділянки пісків, що розвіваються.

Для зандрових рівнин характерне також поширення озер і боліт низинного типу.

***Кріогенний (мерзлотний) рельєф***

Форми і типи рельєфу, що розвиваються в умовах багаторічної мерзлоти і морозного вивітрювання, відображаються на аерофотознімках і великомасштабних космознімках винятково виразно. У цих районах існує найтісніший зв'язок між формами мікро- і мезорельєфу, літологією поверхневих відкладів, ступенем зволоження, мерзлотними мерзлотними умовами і характером рослинності, що дає змогу широко використовувати різні непрямі ознаки дешифрування.

До мерзлотних явищ та процесів належать глибоке промерзання ґрунтів (мерзлота), морозобійне розтріскування та локальні здуття ґрунтів при підземному промерзанні жильних вод, просадки ґрунтів при таненні мерзлоти (термокарст), морозне сортування ґрунтів (полігональні тундри), формування наледів (налідів)[5],

---

[5] "Налід" – запропонований нами переклад терміну замість вживаної копії з російського терміну "наледь". В інших мовах цей термін вживають як " das Aufeis (німецький), "aufeis", "icing", "flood plain icing", "icing field" (англійські) ", "givrage", "de glace fliviale" (французькі). Цими термінами називають явища формування льодових товщ чи покривів, що формуються під час промерзання ґрунтових вод, які виступають на поверхню ґрунту чи в підґрунтових пустотах, печерах, берегах ярів та річок. Цим терміном означають також намерзлий лід на поверхні криги на ріках при їхньому промерзанні до дна і напливанні води на лід.

мерзлотні схилові процеси, формування локальних горбів над замерзлими лінзами ґрунтових вод (булгуняхи) та ін. Процеси та явища, що мають малі лінійні розміри, можуть бути відешифрованими тільки на аерофотознімках та космознімках з дуже високою роздільною здатністю.

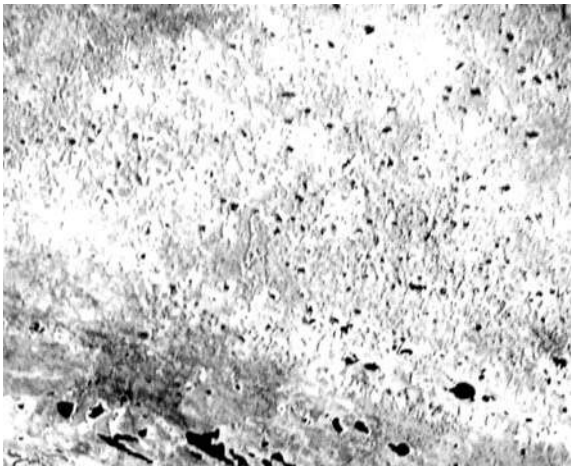
Названі процеси розвиваються тільки в певних поєднаннях водної та теплової (мерзлотної) взаємодії геологічних відкладів, повітряних мас, водних потоків та фільтратів, рослинних покривів у своєрідних фізико-географічних умовах. У зв'язку з цим їхня наявність є свідченням про існування відповідних умов і може служити надійною дешифрувальною ознакою наявності цих умов. Крім цього, дешифрування мерзлотних явищ і складання відповідних карт (кріолітогенних, поширення термокарсту, багаторічної мерзлоти та ін.) мають безпосереднє практичне значення при будівництві доріг, житлових та промислових об'єктів, при вивченні функціонування кріогенних комплексів.

За аерофотознімками успішно вивчають *термокарстові форми* у вигляді провальних або просадових озер, "блюдець", лійок, западин. Вони мають характерні і виразні ознаки на знімках: овальна форма, переважно невеликі за розмірами, дисперсне розташування. Територіально зближені термокарстові блюдця можуть зливатися і формувати "амебоподібні" чи багатолопатеві скупчення, аласи[6], іноді ланцюжки овалів. На знімках такі території представляються своєрідним "вісповим" рельєфом і крапчасто-зернистим рисунком. Дуже виразним такий рисунок стає пізньою весною чи раннім літом, коли в центрі кожного термокарстового зниження формується озерце, по його периферії – кільце трав'яної рослинності, за ним кільце чагарникової рослинності ("єрніки[7]"), а вже далі – зональна лісотундрова, лісова чи інша рослинність. Озерця мають фототон чорний чи темно-сірий, а єрніки та аласи

---

[6] Алас – якутський термін, що використовується в географії для означення великих плоскодонних знижень від просадок на розтопленій поверхні багаторічної мерзлоти. Можуть бути зайняті озерами, болотами чи луками. Є зрілою стадією розвитку термокарсту. Формуються в рівнинних умовах Якутії.

[7] Єрнікі – російський народно-географічний термін для означення частково заболочених заростей з низькорослих чагарників, карликової берези, полярної верби та трав.



*а*

*б*

Рис. 5.38. Термокарстові форми Якутії:
*а* – космозображення, на якому чорні плями – озерця в глибших зниженнях, білі плями – трав'яна рослинність;
*б* – вигляд аласів з гелікоптера.

– дуже світлий (рис. 5.38). Такий контрастний, концентрично-кільцевий рисунок служить надійною ознакою термокарстових понижень. За поєднаннями термокарстових, аласових, флювіальних та останцевих форм рельєфу можна виділяти молодий, зрілий чи деградований термокарстовий рельєф у регіонах поширення багаторічної мерзлоти.

Своєрідні форми мезо- і мікрорельєфу утворюються в процесі *соліфлюкції*, під якою розуміють сезонне повільне зміщення ґрунтів по поверхні мерзлої товщі в результаті протаювання її верхнього шару. Часто зустрічаються натічні форми соліфлюкційного рельєфу – пасма, вали, тераси, поздовжні і поперечні смуги. На схилах з розвиненими соліфлюкційними процесами зазвичай видно малюнок, що нагадує тераси (поперечні смуги) або спостерігається струменистий малюнок (поздовжні смуги) (рис. 5.39). В цьому випадку зміщення ґрунту уздовж схилу часто захоплює за собою рослинність.

*Наліди* можуть формуватися в умовах сильного вихолодження в зимовий період. Вони характерні для північних регіонів материків північної півкулі, але невеликими формаціями можуть зустрічатися і в Україні, особливо в Карпатах. В Сибіру зустрічаються гігантські, часто багаторічні наліди. На знімках в світловому діапазоні ЕМХ їхня біла поверхня добре контрастує з сіри-

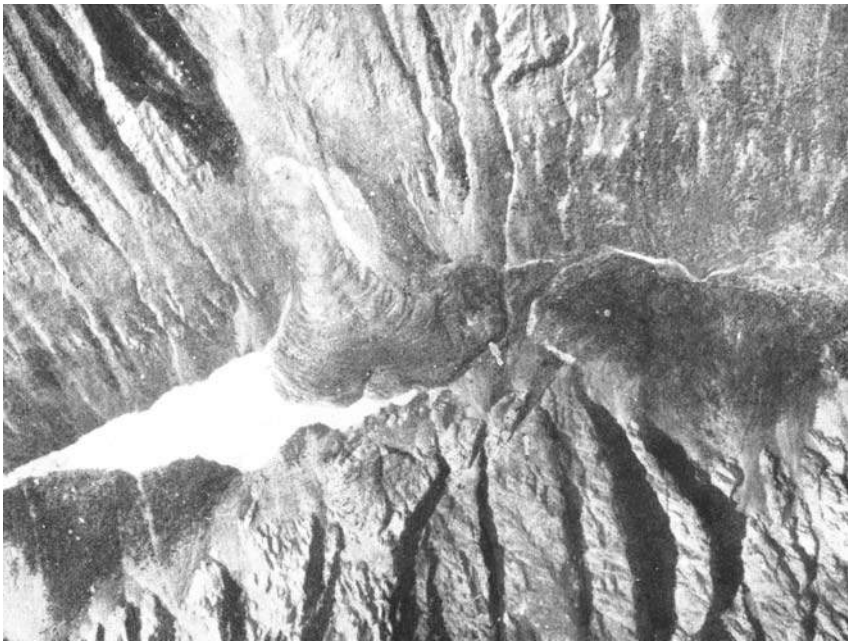


Рис. 5.39. Соліфлюкційний потік у долині сибірської ріки (аерофотознімок).

ми навколишніми природними комплексами. При формуванні налідів у днищах долин рік спостерігається розширення льодових поверхонь та фуркація (розгалуження) русел. В Україні наліди можуть формуватися зимою на схилах з виходами ґрунтових вод, на берегах ярів, каналів та річок в місцях виклинювання ґрунтових вод. Вони не займають великих площ, через що можуть бути зафіксовані тільки великомасштабними знімками, зробленими у весняний період. Частіше їх виявляють при наземних польових дослідженнях.

Багаторічні *горби пучіння* мають в плані овальну або округлу форму. Вона добре видима стереоскопічно. Тон горба світліший, ніж навколишня поверхня. Тінь, що кидає горб, також є дешифрувальною ознакою.

Для арктичної тундри характерні *полігональні форми рельєфу* з жильними льодами. Вони формуються внаслідок морозного розтріскування мерзлого моренного ґрунту, морозного витискання каменів з тіла моренних відкладів у тріщини з наступним винесенням їх замерзлою в тріщині водою (льодом) на поверхню. На поверхні полігональні форми мають вигляд каменистих валиків, що облягають майданчики багатокутної форми, складені дрібноземом. Характерно, що полігони майже правильної геометричної форми. Вони мають темний фототон і розмежовані вузькими світлими смугами, що відповідають жильним льодам.

При подальшому розвитку арктичного болота порушується геометрична правильність полігонів, уздовж тріщин поселяється рослинність, відбувається протаювання полігонів. В результаті цього створюється ландшафт плямистої або *медальйонної тундри*, що відрізняється на знімках великою складністю і строкатістю малюнка. Ці форми добре видні на аерознімках, але через свої невеликі розміри практично не прочитуються на космічних знімках.

Ще один тип морозобійної тріщинуватості складають торф'яні болота. Вони зазвичай приурочені до вододільних ділянок. Тріщини в цьому випадку виникають в кінцевій стадії торфонакопичення. Тріщинуватість при цьому сильно відрізняється від тріщинуватості полігональних боліт. Вся система тріщин значно менш правильна, а полігони мають різну форму і розміри. Тріщини мають темний фототон. Поверхня полігонів порівняно однорідна і їхній фототон світліший за тріщини.

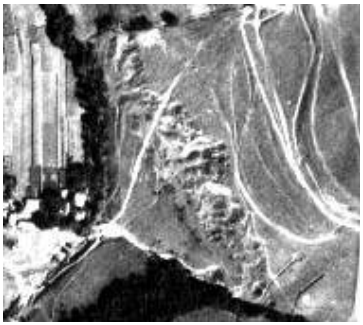
На фотознімках гірських районів в полярних і субполярних районах дешифрують нагірні тераси. Схили з розвиненими на них в декілька ярусів нагірними терасами мають ступінчастий вигляд. Вершини гір в цих умовах бувають майже плоскими або округлими, так звані "гольці". На аерознімках нагірні тераси створюють своєрідний малюнок, складений чергуванням світлих і темних штрихових смуг, що оперізують схили.

***Карстовий рельєф***

Утворення карстових форм рельєфу пов'язане з хімічним процесом розчинення карбонатних і гіпсоносних гірських порід підземними і частково поверхневими водами.

Карстові форми рельєфу, особливо розвинені в областях "голого" карсту, дешифрують з великою детальністю. Карстові лійки пізнають за їхньою округлою в плані формою і більш темним фототоном. Вони чітко видимі на фоні навколишньої місцевості і таким чином можна визначити параметри лійок, площу їхнього ураження. Дно лійок часто буває зайняте озером у вигляді темної округлої плями. З'єднуючись між собою лійки утворюють малюнок, що нагадує соти.

Для каррових полів характерний загальний світлий тон поверхні, на якому видно маса звивистих ліній, борозен, плям химерної форми. Часто виникає, так званий, "віспяний рельєф" (рис. 5.40).



*а*

*б*

Рис. 5.40. Форми поверхневого карсту на аерофотознімках:
*а* – "віспяний рельєф" каррових полів (Придністерське Опілля),
*б* – кільцеподібна структура зображення карстових лійок
(Прут-Дністерське межиріччя).

Форми тропічного карсту – башти, "цукрові" голови" – добре пізнаються під час стереоскопічного вивчення знімків. Доброю дешифрувальною ознакою для них також служать їхні тіні, що дозволяють говорити про форму і висоту карстових утворень.

У рівнинних районах, складених пухкими породами, в результаті діяльності підземних вод і вимивання верхніх невеликих ділянок ґрунту, часто розвинені *суфозійно-просадкові явища*. При цьому на поверхні утворюються плоскі округлі і овальні пониження, западини різних розмірів. На аерофотознімках вони також мають округлі форми, що часто нагадують карстові. Знання літологічної основи дозволяє відмежовувати суфозійно-просадкові форми від карстових. Їх часто називають "степовими блюдцями". Навесні ці мікропониження нерідко заповнюються водою і утворюють дрібні озера. Протягом всього літа в них зберігається підвищене зволоження і розвивається лугова і болотяна рослинність. Ці пониження чудово пізнаються на знімках по їх характерній формі, темнішому і насиченому фототону, ніж навколишня поверхня. У тих випадках, коли для западин характерні засолені ґрунтові води, в них розвивається галофітна рослинність і їхній фототон на аерознімку зазвичай світліший. Дно має плямистий малюнок, а по краях спостерігається яскраво-біла облямівка вицвітів солей.

***Гравітаційний рельєф***

Обвали, зсуви утворюються на схилах річкових долин, морському і озерному побережжі в місцях виходу на поверхню водоносного горизонту.

Обвальні та зсувні ділянки утворюють складний рельєф, який добре дешифрується по аерознімках, завдяки своїй характерній зовнішності. Поверхня ковзання, по якій відбувається переміщення мас, утворює увігнуту всередину і площину, що виположується донизу. Стінка зриву зазвичай має в плані вид підкови.

*Зсувні маси* утворюють на знімках валикову структуру зображення горбкуватої поверхні в межах певної округлої чи грушевидної форми. На схилах виявляють зсувні цирки, уступи, що розвинулись вздовж тріщин відриву, зсувні тераси. Давні зсуви порізані ерозійними борознами, задерновані. Свіжим зсувам властивий світлий фототон борозен, різкі валиково-натічні форми (рис. 5.41).

*Обвали* пов'язані зі швидким епізодичним зміщенням делювіальних, зрідка корінних, порід. Дешифрують за наявністю

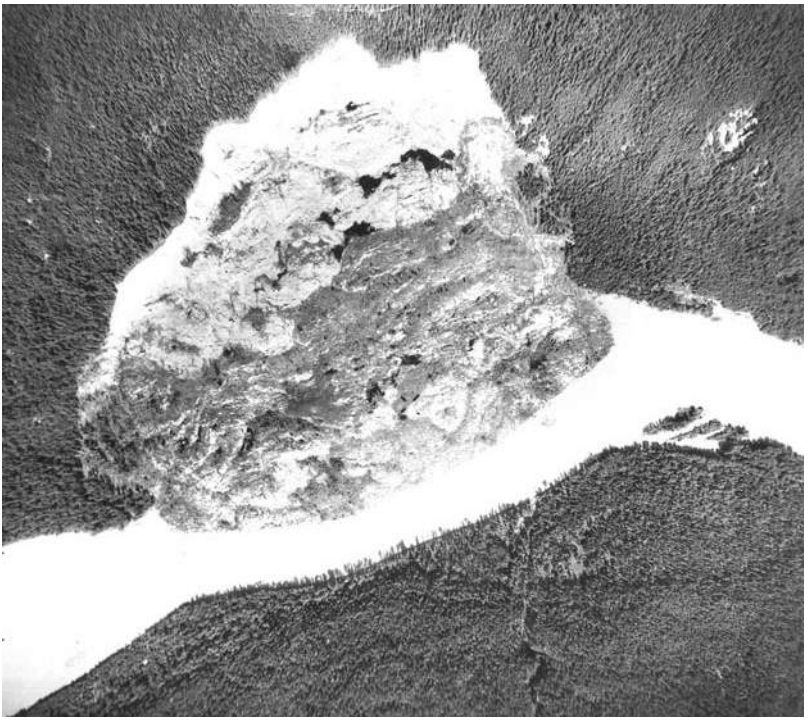


Рис. 5.41. Зсув на корінному схилі (притока р. Юкон).
Білуватим фототоном у верхній частині знімка виділилась стінка відриву зсуву. Тіло зсуву перекрило частину русла ріки, яка теж має білий фототон через велику мутність.

на схилі циркоподібної ніші, оточеної уступом, контури якого пов'язані з напрямом простягання тріщин, по яким відбувся відрив обвального тіла. Тіла обвалів мають складний горбистий рельєф, що дешифрується за строкатим малюнком і тінями від мікрогорбів. Мають форму валу або конуса. На знімках за зовнішнім виглядом також можна визначати відносний вік обвалу. Свіжі обвали відрізняються різкою вираженістю форм, тоді як старші зазвичай бувають згладжені і деформовані подальшими ерозійними процесами. Молодші обвали на знімках мають більш контрастний фототон і розріджену рослинність.

*Осипища* формуються у підніжжях урвистих схилів і складаються з уламків корінних порід. Мають вигляд кам'яних потоків чи осипних конусів, вершинами направлених вверх до схилу.

Свіжі осипища позбавлені рослинності і мають світлий фототон на знімках.

*Опливини* являють собою масу в'язкого делювію, який стікає по схилу у вигляді грязьового потоку. На знімках виділяється за язикоподібними формами з горбкуватою поверхнею, яка відображає напрям потоку.

***Еоловий рельєф***

Рельєф пісків знаходиться в тісній залежності від того, що оточує і створює його географічний ландшафт – особливості рельєфу, клімату, рослинності, поверхневих і ґрунтових вод, кількості піску, ступеня його оголеності, сипучості, діяльності тварин і людини. Основною ж силою, що формує рельєф пісків, є вітер. Вивчення піщаних пустель показує, що вражаюче закономірний і значною мірою геометрично правильний їхній рельєф створений за єдиними законами руху повітряних мас.

Залежно від напряму і режиму вітрів відбувається формування того або іншого типу піщаного рельєфу. Вітер в процесі своєї діяльності створює рельєф в рівній мірі дефляційний і акумулятивний. У областях прискорення вітрового потоку, на околицях пустель може створюватися дефляційний рельєф у вигляді улоговин розвівання, дефляційних жолобів і коридорів, та гряд, що їх розділяють. Ці форми добре пізнаються на знімках за лінійною формою і різкими тінями.

У внутрішніх і завітрених частинах пустель зустрічаються переважно акумулятивні піщані форми.

У безвітряні жаркі дні в пустелях спостерігають смерчі, пов'язані з явищем конвекції. Під впливом цього процесу формується своєрідний конвекційний або інверсійний рельєф пісків, представлений зазвичай комірчастими формами. Для нього характерні округлі блюдцеподібні пониження і горби, що їх розділяють. На аерознімках комірчасті піски утворюють малюнок суцільних округлих, різноманітно орієнтованих плям різних тонів. Набагато частіше в пустелях панують вітри одного або декількох близьких напрямів. У цих випадках переважають поздовжні вітру піщані гряди. Рельєф пісків, що формується в цих умовах, відносять до пасатного.

Для піщаних пасм характерна прямолінійна форма і витриманість орієнтування на величезних відстанях. На великомасш-

табних знімках піщані пасма відображаються смугастими текстурами, у яких чергуються світлі і темні лінійні елементи. Темніші смуги відповідають міжпасмовим пониженням. Коли відбувається гальмування вітрового потоку або його сезонна зміна, виникають перпендикулярні вітру форми рельєфу пісків – брижі, бархани, барханні ланцюги, дюни. Ця картина типова для приморських районів. Тип еолового рельєфу, що утворюється при цьому, відносять до муссонно-бризового типу.

Окремі *бархани* легко дешифрують за їхнім характерним серповидним зображенням і темнішим фототоном, ніж навколишня поверхня. Вони дають різку тінь від крутого протилежного вітру схилу. Витягнуті скупчення барханів утворюють барханні ланцюги (рис. 5.42).

*Піщані брижі* дають на знімку смугастий малюнок, що нагадує вкриту дрібними хвилями поверхню водоймища (рис. 5.43).

*Дюни* за своїм малюнком на знімках дещо нагадують пасма, даючи картину подовжніх світлих смуг різної ширини з темнішими проміжками між ними, відповідним пониженням і тіням. Поздовжній малюнок дюн в порівнянні з пасмами не відрізняється чіткою витриманістю орієнтування і ширини елементів, властивих останнім.

У разі віддзеркалення вітрового потоку від орографічних перешкод виникає інтерференційний аеродинамічний тип рельєфу пісків. У цих випадках утворюються пірамідальні, горбисті і купчасті піщані скупчення.

Рис. 5.42. Серповидні ланцюги барханів частково заліснені (аерофотознімок пустелі Вікторія в Австралії).

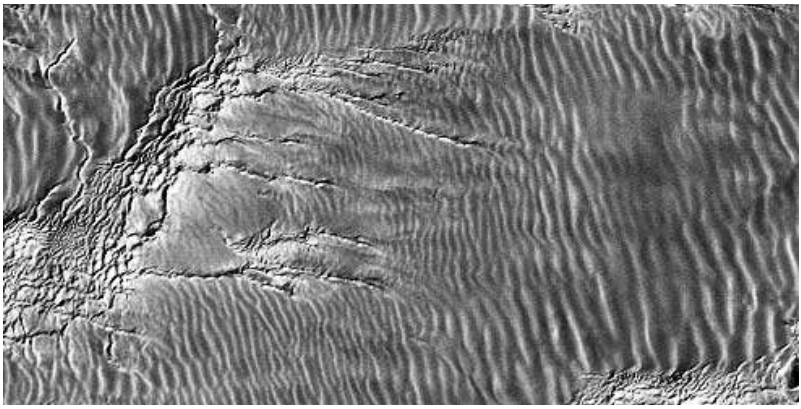


Рис. 5.43. Піщані брижі на поверхні пагорбів (Лівійська пустеля).

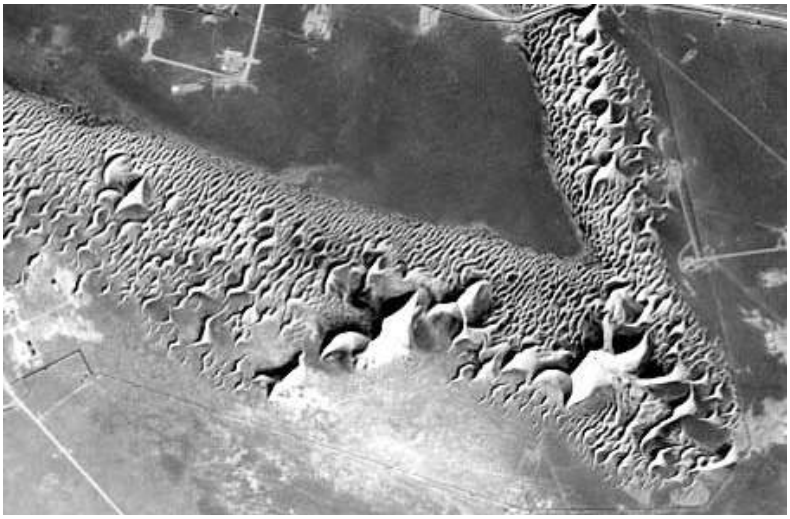


Рис. 5.44. Пірамідальні дюни у пустелі Руб-ель-Халі в Аравії.

На аерознімках купчасті і горбисті піски дають досить строкату картину світлих і темних плям, тіней, понижень, та улоговин між горбами. Зустрічаються темні плями зернистої структури, які відповідають скупченням рослинності.

Пірамідальні дюни зображені на знімках у вигляді характерних трьохпроменевих зірок темного фототону (рис. 5.44). Вони утворені чергуванням вітрів різних напрямів.

Під час дешифрування рельєфу піщаних пустель вдається розпізнати глинисті знижені ділянки з плоскою поверхнею – такири. Їхня поверхня гладка, світло-сірого тону. Під час дощів на ній утворюються дрібні озера у вигляді темних плям різної форми і величини. При висиханні на поверхні такира утворюється мережа полігональних тріщин, що зображаються на знімках у вигляді ламаних пересічних ліній темного тону.

***Вулканічний рельєф***

Поверхневі частини центральних вулканічних апаратів надзвичайно різноманітні за формою і величиною. Серед них можна виділити декілька типів.

Найбільш примітивною формою вулкана є маар. Він являє собою негативну форму рельєфу: лійкоподібне або циліндричне заглиблення поверхні, часто заповнене водою. Навколо нього іноді розташовується невисокий валик.

Форма маара в плані, зазвичай більш менш правильна – округла; краї його ніколи не мають різких, ламаних контурів. На знімках маари мають вид округлих або декілька овальних плям темного тону. Канал маару може бути заповнений затверділою магмою. В тому випадку, якщо процеси денудації руйнують верхню частину каналу,

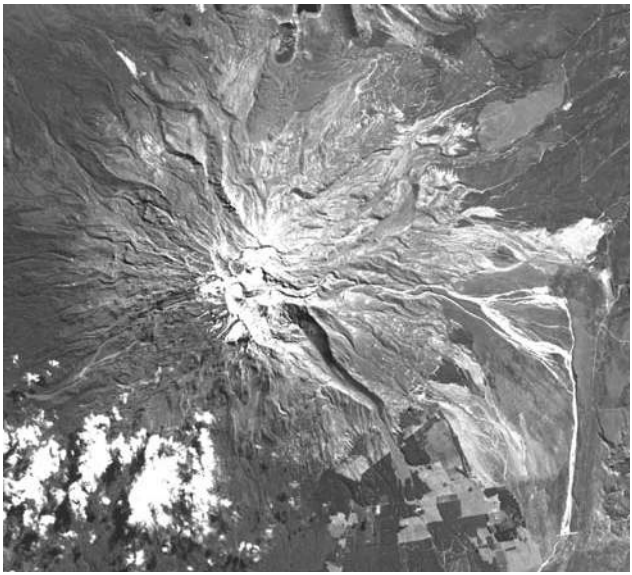


Рис. 5.45. Вулкани Нової Зеландії.

на денну поверхню виходять вулканічні пробки, що виділяються в рельєфі у вигляді останців. Вони добре пізнаються на знімках стереоскопічно, а також за падаючими від них темними тінями.

Недорозвиненими вулканами іншого роду можна назвати лаколіти. У цих утвореннях магма не досягла земної поверхні, а тільки вторглася по тріщинах або трубкоподібному каналі в поверхневі товщі осадових порід і застигла між ними у вигляді лінзоподібних тіл. Підведені інтрузією верхні шари утворюють в рельєфі куполовидні підвищення округлої масивної форми, добре помітні при стереоскопічному вивченні знімків.

Подальші розмиви і денудація можуть зруйнувати крівлю вершини і вивести магматичне ядро на денну поверхню. Ядро лаколітів зазвичай утворене в'язкими малорухливими кислими лавами, які пізнаються на знімках за відсутності шаруватості, однорідному тону і наявності коміркового малюнка тріщин, до яких часто бувають приурочені долини річок.

Для добре розвинених вулканічних апаратів характерні конічне або куполовидні підвищення, складені вулканічним матеріалом. Поверхня вулканічних конусів пронизана ерозійними борознами, що радіально розходяться від кратера і мають світлий фототон на фоні темного зображення (рис. 5.45).

Вулкани, звані екструзивними куполами, виникають при центральних виверженнях кислих лав великої в'язкості. Така лава малорухлива і нагромаджується над центром виверження у вигляді куполу значної висоти (100–200 м). Екструзивні куполи зазвичай не мають кратера. Вони пізнаються стереоскопічно за округлою формою, тінями і відсутності видимого центру виверження. Денудаційні процеси можуть розкрити внутрішню будову екструзивного куполу і тоді на знімку спостерігається лускувато-концентрична шаруватість, пов'язана з наростанням куполу зсередини, розтяганням і розриванням зовнішніх шарів.

Щитові або лавові вулкани утворюються при центральних виверженнях дуже рідкої і рухомої основної лави. Вона розтікається тонким шаром на великі простори. При повторних виверженнях тонкі шари лави створюють полого-випукле щитовидне підвищення з кратером посередині. Характерною межею цих вулканічних утворень є їхня незначна висота і плоска форма. В плані щитові вулкани досягають величезних розмірів, що доходять до декількох

десятків кілометрів в поперечнику. На аерофотознімках добре помітні темні плями їхніх кратерів.

Більшість великих вулканів належать до шаруватих. У їхній будові беруть участь шари тих, що вилилися, і отверділих лав, що чергуються між собою, а також пухких пірокластичних продуктів, які перетворилися на щільний туф. Шаруватим вулканам в основному властива правильна конічна форма. Часто зустрічається форма усіченого конуса з обширним лійкоподібним вертикальним кратером.

В основі вулканічних конусів часто розташовані ділянки, зайняті застиглою лавою. Їхню поверхню розпізнають за неоднорідним фототоном унаслідок характерних для лавових покривів горбів стиснення, складок, хвиль, газових лійок. В цілому лавова поверхня зображається на знімках у вигляді плями м'яких контурів, що оточує вулканічний конус. Лавові потоки і поля, як правило, розташовуються незалежно до рельєфу. Поверхня самих вулканічних конусів часто поцяткована ерозійними борознами, що радіально розходяться, у вигляді темних штрихів на фоні світлішого конуса (рис. 5.46).

Виливи лави по тріщинах призводить до утворення дайок. При їх препаруванні денудаційними процесами виникають витягнуті гряди, гребені, пізнавані на знімках за лінійно-витягнутою формою і падаючими тінями.

Актуальним аспектом вулканогенних досліджень є спостереження динаміки вивержень вулканів. За космознімками, які оновлюються кожні шість годин, можна бачити початок активізації вулканів, коли з вулкана лише починає виходити пара, розвиток виверження та його затухання (рис. 5.3.22). Космознімки є тим фактичним джерелом інформації, яке задіюють служби з надзвичайних ситуацій для прийняття оперативних управлінських рішень.

Іноді в рельєфі спостерігають броньовані поверхні, що утворилися в результаті виливу на поверхню і подальшому застиганню магми. Стійкі до процесів денудації магматичні покриви приводять до утворення таких форм рельєфу, як столові плато, терасовидні уступи на схилах. Їхніми дешифрувальними ознаками зазвичай є однорідний фототон і рівна плоска поверхня.

Отже, генетичні типи рельєфу дешифрують за такими ознаками:

- флювіальний рельєф – за лінійною звивистою формою, темним фототоном чистої води і світлим – мутної;

*а*

*б*

Рис. 5.46. Виверження вулкану Етна на о. Сицілія у березні 2002 р.
(а – початок процесу на космознімку зі супутника Terra,
б – активна фаза на фото з гелікоптера).

- еоловий рельєф – за білуватими відтінками фототону на задернованих територіях, серповидною, валоподібною формою окремих утворень, комірковою та гривистою текстурою для груп;
- карстовий рельєф – за округлою формою і темним фототоном поверхневих западин;
- гравітаційний рельєф – за валиковою текстурою і світлим фототоном борозен;
- льодовикові форми: трогові долини – за паралельними границями плечей, друмліни – за короткою видовженою формою, ози, ками – за вузькою вигнутою довгою формою, моренні горби – за комірковою структурою; форми зледеніння в горах (кари, цирки) – за півкруглою формою;
- вулканічний рельєф – за кільцеподібною формою із радіальною системою борозен – барранкосів, іноді темний фототон центра кола (попіл в активних вулканах);
- структурний рельєф – за крутими чи урвистими схилами, уступами на схилах, різкими врізами долин, прямолінійністю їхніх русел, різкими огинаннями виступів схилів;
- рельєф берегів: абразійні береги – за різкістю берегових ліній, акумулятивні – плавні вигини, наявні пляжі світлого фототону (див. п. 5.4 і 5.8).

### *5.3.3. Інтерпретація морфодинамічних процесів*

Важливими об'єктами, які вивчають за допомогою аерокосмічної інформації під час геоморфологічних досліджень, є морфодинамічні процеси. Їхня інтерпретація базується головно на застосуванні прямих ознак, зокрема, фототону, форми, структури і текстури зображення. Неоціненним способом отримання інформації про процеси є встановлення стереоефекту на стереопарах знімків. За знімками дешифрують прояви різних генетичних типів процесів, їхні форми (див. п. 5.3.Б), площу охоплення, вплив на територію і господарські споруди. Чітко дешифрують стан процесів – активний чи пасивний.

Виявляють також чинники та умови, що спричинюють і контролюють небезпечні морфодинамічні процеси. Найважливішими чинниками, що визначають використання і контролюють розвиток

процесів, є рельєф, клімат, геологічна будова території, напрям та інтенсивність сучасних тектонічних рухів, ступінь сейсмічної активності території. Відповідно до цього, у межах конкретних площ, які відрізняються за такими ознаками, розвивається характерний комплекс цих процесів. Наприклад, склад відкладів визначає розвиток карсту (карбонатні галогенні породи), зсувів (у більшості випадків глинисті породи), просадкових явищ (лесові породи) та ін. У лісовій і лісостеповій кліматичних зонах переважають такі типи процесів, які пов'язані з діяльністю поверхневих і підземних вод, та гравітаційні процеси. Рельєф визначає набір процесів для рівнинних (заболочення, засолення) та гірських (гравітаційні, ерозійні процеси) територій. Сучасні тектонічні рухи спричинюють різні сейсмодислокації і сейсмогравітаційні явища, які фіксують за дистанційними даними.

Зі зміною умов і чинників, що контролюють розвиток процесів, змінюється й набір ландшафтних індикаторів, які можна використовувати для інтерпретації процесів. Тому перед початком дешифрування морфодинамічних процесів ознайомлюються з матеріалами, які характеризують природні умови території, рельєф і геологічну будову та інші, перечислені вище, чинники. Це дає змогу значно обмежити коло можливих процесів, передбачити найімовірніші форми їхнього прояву і деякі інші характеристики, а також намітити склад індикаторів, які доцільно використати для інтерпретації. Загалом, можна дешифрувати певні види процесів цілеспрямованіше й ефективніше.

За різночасовими знімками, знятими у різні роки чи десятки років, виявляють зміни у стані процесів – активізацію, повільний розвиток чи стабілізацію процесів (рис. 5.47). Зазначимо, що одні типи процесів протікають поступово, зміни наростають повільно, інші процеси відбуваються стрибкоподібно, з раптовими новоутвореннями. Застосовуючи різночасові знімки виявляють характер змін, що відбулися. Позитивним у цьому випадку є те, що виявлені зміни прив'язані не до точок і створів, як у разі наземних стаціонарних досліджень, а до всієї площі загалом, що дає статистичний матеріал та значно підвищує надійність усіх висновків і узагальнень.

Дистанційні дані забезпечують отримання об'єктивної та оперативної інформації про морфодинамічні процеси з різним ступенем деталізації й генералізації – від локальної до регіональної і навіть глобальної, що неможливо зробити іншими засобами.

*а*

*б*

Рис. 5.47. Зміни у проявах карстових та ерозійних процесів за різночасовими аерофотознімками: *а* – 1952, *б* – 1984 роки. Видно збільшення карстових лійок на вершині пагорба та утворення ярів і борозен у місцях проходження ґрунтових доріг.

*Дрібномасштабні космознімки* (роздільної здатності 1 км/пкс) дають уявлення про поширення головних типів екзогенних процесів на значних площах. На знімках дрібних масштабів добре видно морфоструктури та їхні елементи та простежується зв'язок між ними і генетичними типами процесів. Це дає змогу виявити регіональні закономірності процесів та найбезпечніші площі з погляду дії несприятливих процесів. Головними ознаками інтерпретації рельєфоутворювальних процесів на дрібномасштабних знімках є малюнок і фототон зображення. Результати дешифрування застосовують під час типізації процесів і складання оглядових карт їхнього поширення.

На *середньомасштабних космознімках* (роздільної здатності 30–40 м/пкс) вивчають геолого-літологічні, геоморфологічні та гідрогеологічні чинники рельєфоутворювальних процесів. На цих знімках виявляють особливості поширення генетичних типів процесів, їхнє морфологічне вираження, всі головні типи морфоскульптури та її елементи, експозиції схилів, густоту й глибину ерозійного розчленування території та їхні зв'язки з загальними геоморфологічними умовами; якщо можливо визначають вікові генерації різних форм та літологічний склад відкладів. Головними дешифрувальними ознаками виступають конфігурація форм прояву процесів та стереоскопічні властивості знімків, фототон і структура зображення. За результатами дешифрування складають спеціалізовані карти сучасного стану й умов розвитку екзогенних процесів, виконують районування території за інтенсивністю прояву процесів на підставі кількісних показників.

*Аерофотознімки і космознімки* великої роздільної здатності (5–10 м/пікс) використовують для отримання інформації про інтенсивність розвитку екзогенних геоморфологічних процесів на конкретних ділянках. На цих знімках добре видно окремі прояви процесів, зокрема, ділянки площинної ерозії, розвіювання пісків, перезволоження, відкритого карсту, яроутворення та ін. Фіксують також реальні зв'язки між проявами екзогенних процесів та умовами їхнього розвитку. Це дає змогу виявити стадії розвитку екзогенних процесів, побудувати еволюційні ряди їхнього розвитку, кількісно оцінити ступінь їхньої активності. Головними ознаками дешифрування стає фототон і структура зображення. Зокрема, поява світлого фотону на фоні темного вказує на наяв-

ність делювіальних змивів на полях, активізацію лінійної ерозії, початок еолового розвіювання та н. типи процесів. Поява темного фототону на фоні більш світлого говорить про посилення процесів заболочування і перезволожування земель. Поява штрихових чи валикових структур на фоні більш однорідних вказує на сходження зсувів, обвалів, опливин.

Принципова схема морфодинамічних аерокосмічних досліджень передбачає декілька методів отримання динамічної інформації зі знімків, головні з яких – динамічне дешифрування багаточасових знімків, динамічна фотограмметрія, фотометричне опрацювання знімків у дослідженнях динаміки, а також цифрове опрацювання знімків.

Динамічне дешифрування аерокосмічних знімків зводиться до якісного аналізу динаміки природних та соціально-економічних явищ і процесів. Найбільшого поширення з усіх способів під час аналізу динаміки набуло візуальне (візуально-інструментальне) дешифрування як одномоментних, так і різночасових аерокосмічних знімків.

Під час дешифрування одномоментних знімків головним є географічна індикація та використання просторово-часових генетичних рядів, у роботі з різночасовими знімками – прийоми їхнього зіставлення, послідовне або зіставлене дешифрування.

Динамічна фотограмметрія, або фотограмметрія різночасових знімків, досліджує зміни просторового стану об'єктів, характер перебігу процесів шляхом визначення геометричних показників динаміки. Для отримання кількісних показників виконують такі операції: вимірюють знімки, переходять від виміряних за знімками значень до показників, які шукають, відображають отримані результати в графічному і картографічному вигляді.

За допомогою різночасових аерофотознімків складають карти динаміки сучасних геоморфологічних процесів, форм і відкладів, які використовують в інженерних та природоохоронних цілях.

Визначені за знімками показники динаміки фіксують на картах різного часового проміжку. Сучасне програмне забезпечення дозволяє виконати анімацію змін, що відбулися на території. Така візуалізація дозволяє наочно побачити, наприклад, трасу, по якій проходитиме сель чи лавина; площу, яку охопить процес; споруди, які опиняться в зоні впливу процесу тощо. За такими рухомими моделями виникає можливість вирішити одну із важливих проблем геоморфології – складання прогнозів розвитку морфодинамічних процесів.

## 5.4. Інтерпретація об'єктів гідрографії

### *5.4.1. Дешифрування рік*

Всі великі водні об'єкти у більшості діапазонів ЕМХ, використовувані для ДДЗ мають темні і чорні фототони, а тому їх легко розпізнають. Водні об'єкти створюють, фактично, головні риси рисунку переважної більшості території Землі, в поєднанні з акваторіями такий рисунок стає легко впізнаваним, а тому сам має самостійне орієнтувальне значення, а також його використовують як дешифрувальну ознаку для території, на якій його зафіксовано. Разом з тим власне гідрографічні об'єкти є важливими об'єктами дешифрування, цікавими для океанографії, морської гідрології, гідрології суші (гідрографії, лімнології, болотознавства).

*Русла річок* – найбільш яскраво виражені на дистанційних матеріалах елементи місцевості. При дешифруванні річкового русла визначають його особливості в плані – звивистість, розгалуженість, напрям і приблизну швидкість течії. Швидкість течії залежить від розташування ріки на рівнинній чи височинній території та ширини русла. За знімками визначають також параметри основного русла та приток, каналів, наявність старорусловиx утворень, проточних та замкнутих старичних озер, гребель, мостів чи бродів, льодоставу, забруднення та замулення та ін. (рис. 5.48).

Руслові утворення пізнають на аерофотознімках на підставі прямих дешифрувальних ознак (зображення самих русел легко розрізнити навіть початківцю). Відкриту водну поверхню русла дешифрують за характерною звивистою формою, рівномірному і майже безструктурному малюнку. За фототоном поверхня річкового русла може бути різною залежно від умов знімання (від білого до чорного). Чорно-білі тони та колір залежать від кольору води, і її прозорості, глибини, кольору дна і стану водної поверхні. Білі і світло-сірі тони води в руслах рік бувають за наявності на водній поверхні сонячних відблисків, світлому дні при малій глибині, значній каламутності води, при льодоставі чи льодоході, або на знімках, зроблених в фіолетовому діапазоні ЕМХ. Темні відтінки фототону свідчать про глибоку прозору воду у руслі (нагадаємо, що в цьому випадку коефіцієнт поглинання є більшим, ніж у каламутної води).

Непрямі ознаки також допомагають виявляти русла невеликих рік або замаскованих рослинністю (рис. 5.49). При цьому

Рис. 5.48. Русло р. Дніпро у Києві. Річища з відкритою водою зобразились чорним, відмілини в руслі, мости – темно-сірим, алювіальні відклади на берегах, сухі стариці – білим. Повсюдно проявилася біфуркація (роздвоєння) русла. Видно також уступ крутого правого берега та низинний лівий берег.

допомагають теоретичні знання з географії та польовий досвід дешифрувальника. Непрямі ознаки базуються на залежностях між контурами русла в плані, характером рельєфу берегів, рослинністю і т. п. Вздовж рік, що пливуть в природних берегах, можуть також рости дерева чи верболози, які створюють характерне “бордюрне” обрамлення з двох берегів і цим підкреслюють місцеположення русла. В сильно залісненій місцевості русло річки, навіть повністю закрите кронами дерев, може бути виявлене за зображенням на тлі лісу характерної звивистої смуги темного або світлого тону.

Рис. 5.49. Русло р. Дусини (притоки Латориці) виявлене на космознімку за розташуванням на берегах чагарникової рослинності. За приуроченістю чагарників до днищ і їхньою стрічковою формою розпізнають малі долинні форми.

У пустелях і напівпустелях дешифрують русла висохлих рік (делі, ваді), які заповнюються періодично під час сезонів дощів. В іншу пору року вони пересихають. На знімках такі русла зображені світлими відтінками фототону (рис. 5.50).

Для гірських річок характерна загальна спрямленість, можлива дрібна звивистість на ділянках зменшення швидкості течії, та спрямленість на відрізках збільшення швидкості. Наявність долин у горах та на розчленованих височинах дешифрують за специфічним дендритовим рисунком водозборів, ялинкоподібними з'єднанням приток, за границею освітленої і затемненої ділянки схилу (рис. 5.51). Деяку аналогію з малими ріками можуть представляти дороги з твердим покриттям в долинах гір, бо такі дороги і русла можуть бути однакової ширини, повторювати повороти долин, перетинати одна одну. Проте доріг з твердим покриттям у гірській місцевості не так багато, а ґрунтові дороги

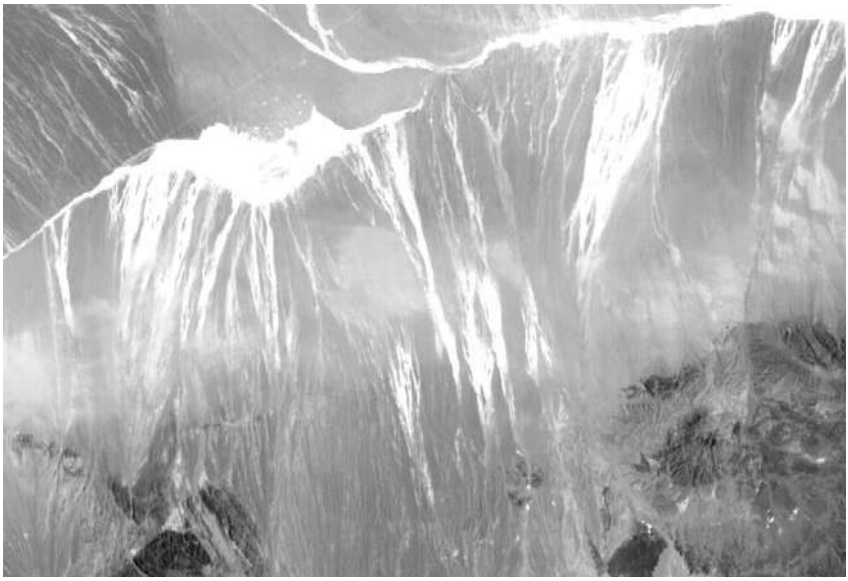


Рис. 5.50. Сухі долини рік у Монголії.

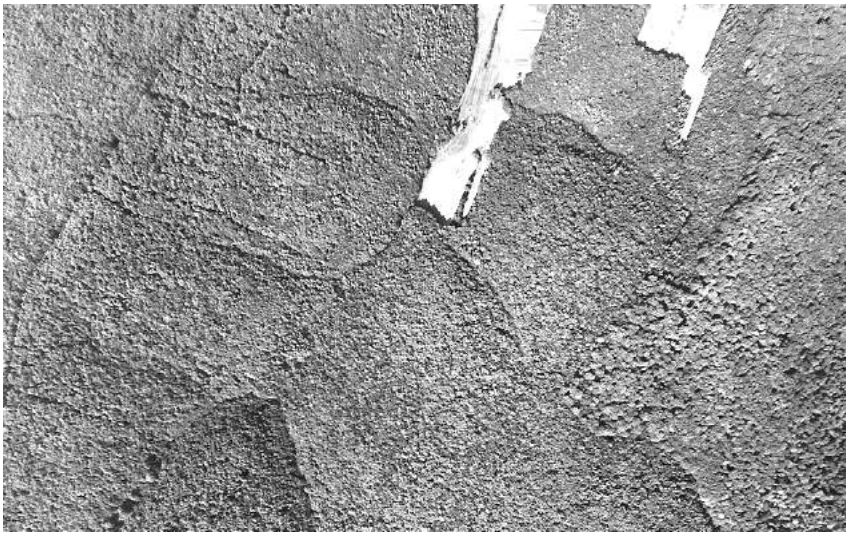


Рис. 5.51. Дендритовий рисунок річкового водозбору на височині Розточчя, суцільно вкритому лісовою рослинністю. Днища долин добре вирізняються своїми лінійними формами та відсутністю зернистості.

та проїзди мають меншу ширину, ніж русла, світліші відтінки фототону, більш прямі відрізки, яке, в цілому, не перешкоджає розпізнаванню русел.

Більші русла рік, на знімках зображаються не лінією, а смугою відповідної ширини (рис. 5.52). В цих випадках видні зміни ширини русла, його розгалуження на рукави, острови, плеса і перекати, берегові відмілини стариці в межах заплави, підмиви берегів, затоплення долин допливів, формування площ свіжого алювію, перевідкладення старого алювію та ще багато інших руслових процесів.

Для дешифрування руслових процесів більш зручними можна вважати аерофотознімки та космічні знімки дуже високої роздільної здатності. На таких знімках добре видно форми рельєфу русла. Так, перекатам в руслі відповідають його частини з найбільш світлими тонами, майже симетричними стосовно центральної найсвітлішої частини, що відповідає поступовому зменшенню глибини до центра, а за ним – наростанню глибини. Перекати часто бувають не поперечними, а косими стосовно простягання русла та його берегів, що особливо характерно для передгірських рік, багатих на русловий алювій та паводковий рівневий режим.

Рис. 5.52. Розширена частина ріки Дністер перед Дністерською ГАЕС. Водою зайнята вся заплава та устя приток та балок. Нижче від греблі ріка сильно звужена. Прилеглі межиріччя зайняті полями та луками, круті схили – лісами.

Плеса в руслах зазвичай відповідають ділянкам з найбільш щільним темним фототоном. При дешифруванні плес і перекатів слід звертати увагу на узгодженість їхнього розташування із закрутами русла. Перекати формуються найчастіше після повороту русла, спочатку як руслова відмілина (коса) від берега, що підмивається до середини русла, а пізніше й до протилежного берега, вже як перекат.

Острови, відмілини, коси та пляжі пізнають за їхнім розташуванням в руслі і дуже світлому тону зображення. Однак, для правильного їхнього дешифрування слід знати закономірності формування руслових процесів та їхні характерні фізіономічні прояви.

На аерофотознімках може бути добре видно навіть малюнок брижів піщаного дна, якщо товща води невелика. Поверхня мілководь завжди відрізняється світлим тоном безструктурного малюнка. Такими є прибережні мілини великих рік, їхні коси, пляжі з піщаним та галечниковим алювієм що не заросли травами чи чагарниками.

Річкові пороги характерні, переважно, для гірських річок, русла яких перетинають поперечні смуги твердих пластів. На рівнинних ріках вони трапляються значно рідше, але також приурочені до виходу в днищах твердих порід, або ж антропогенних перешкод. Річкові пороги дешифрують за поперечними чи косими смугами в руслі та за світлими плямами водоспадів, що формуються при порогах нижче за течією. Великі пороги вирізняються білими смугами піни, що простягаються вниз по течії річки.

Водоспади – зазвичай добре видні на аерофотознімках як білі смуги пінистої води, що простягаються упоперек русла. За певних умов освітлення безпосередньо при лініях водоспадів можна спостерігати темні смуги тіней від уступів. Якщо водоспад не має лінійного уступу, а сформований як відрізок русла з крутим падінням, то пініста вода і характерний для її зображення білий фототон видно на всьому протязі крутого спадистого русла.

*Напрям течії ріки* визначають на аерофотознімках за численними непрямими ознаками – характером взаємного розташування річок і їх допливів (приток), форми руслових утворень, споруд на річках. Як правило притоки впадають в основну річку під гострим кутом, вершина якого спрямована вниз за течією.

Острови, відмілини зазвичай направлені гострим кінцем вниз за течією і овальним назустріч течії. Характер розташування "віял" прибережних та заплавних відкладів також допомагає визначити напрям течії річки. Зазвичай, розширена сторона валів розташована вище за течією (рис. 5.53, 5.54).

*Швидкість течії ріки* приблизно може бути визначена за непрямими ознаками: за "впорядкуванням" у руслі водної рослинності, за характером берегів, ухилом русла, мінливістю фототонів вздовж русла. Для річок з повільною течією характерна велика звивистість, часте і широке меандрування та наявність в руслі водної рослинності, добре помітної за мінливістю тонів. У великих річках водна рослинність притримується лише відмілин та місць з сповільненою течією.

Повільну течію можуть мати також і прямолінійні відрізки спрямлених рік – каналів на плоских рівнинах та низинах. Ознакою повільної течії в неглибоких річках є наявність в руслі рівномірних заростей водної рослинності. Відкриту воду, водорості та надводну рослинність дешифрують за фототонами у світловій

Рис. 5.53. Фрагмент спільної долини рік Дністер та Стрий (зліва) в місці їхнього злиття. Добре видні меандри сучасних русел рік та петлі старих русел, зайнятих старичними озерами. Білим фототоном зобразились берегові відмілини та острови з свіжим алювієм. Напрям течії річок видно за формою островів, формою дуг і петель стариць (верхня частина дуги майже завжди коротша від нижньої).

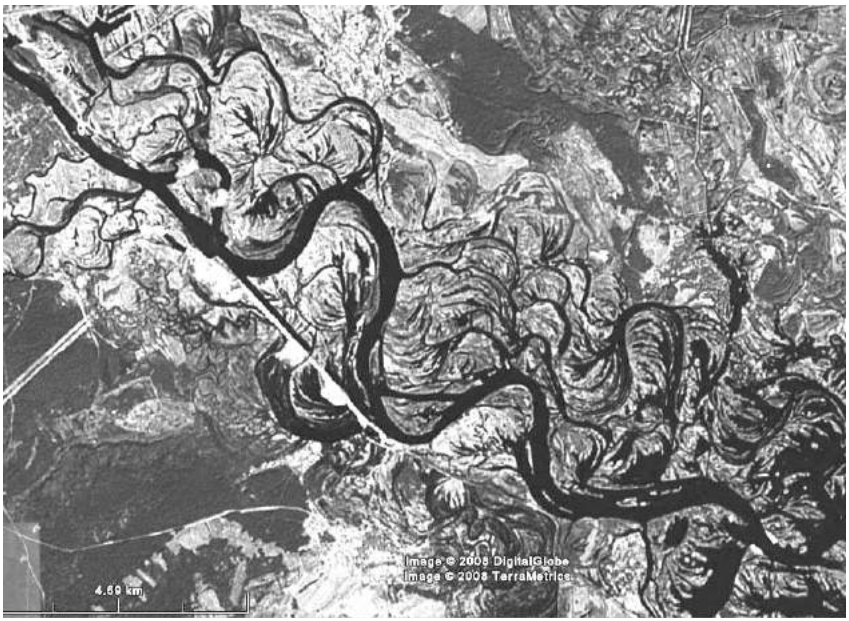



Рис 5.54. Меандри та стариці річки Прип'ять нижче від Чорнобиля, де швидкість течії зменшена до мінімуму близькістю до впадіння в Київський водозбірник. В заплаві багато меандр і стариць. Поміж дуговими руслами стариць на заплавах наявні берегові вали алювію. Видно інженерні споруди.

частині спектру від чорного до сірого фототонів на чорно-білих знімках і за кольорами, що відповідають природним кольорам наземних покривів на ортохромних зображеннях та за спеціальним (залежно від варіантів синтезу) кольорам на знімках з синтезованими кольорами.

Точніше швидкість течії річки може бути визначена при використанні спеціальних способів. Для цього застосовують кількакратне знімання (фотографування) русла, в яке запускають спеціальні маркувальні предмети, буї, або застосовують фарбування води безпечними барвниками.

Наявність меандр не завжди свідчить про рівнинність території та про малу швидкість течії. Трапляється, що меандри, закладені річкою в давній період тектонічного спокою, згодом, в період тектонічного підняття, можуть заглибитись донною ерозією і надовго

Рис. 5.55. Меандри притоки р. Урал (Росія), врізані у прилеглу височину і створюють цим своєрідний каньйон: круті береги і практично відсутня заплава. На космознімку не спостерігаємо ознак рівнинної ріки – сегментів стариць, "віял блукання" та ін.

успадкувати старий рисунок меандр, навіть створювати меандрові каньйони. Додатковою ознакою глибоко врізаних меандр є відсутність в долині слідів горизонтальної міграції русла – стариць старих русел, старичних озер чи гривистої заплави. В таких випадках меандри не можуть служити ознакою повільної течії. (рис. 5.55).

Русла рік – надзвичайно динамічні об'єкти природного середовища. Особливо це стосується рівнинних та передгірських рік. Під час збільшення води внаслідок повеней і паводків вони розширюють старі та прокладають нові русла, заповнюють сухі рукави і стариці, формують нові озера у заплаві, острови та коси у руслі. Новоутворені форми можуть зникати під дією нових процесів, змінюватись під час незначних збільшень чи зменшень води або залишатись незміненими протягом тривалого часу. Динамічні перетворення русла та форм у руслі можуть відбуватись протягом сезону весна-літо, протягом кількох років та десятка років. Саме ці періоди змін добре фіксують різночасові аерофото- і космознімки (рис. 5.56). Аналіз змін русла проводять також за порівнянням знімків і карт.

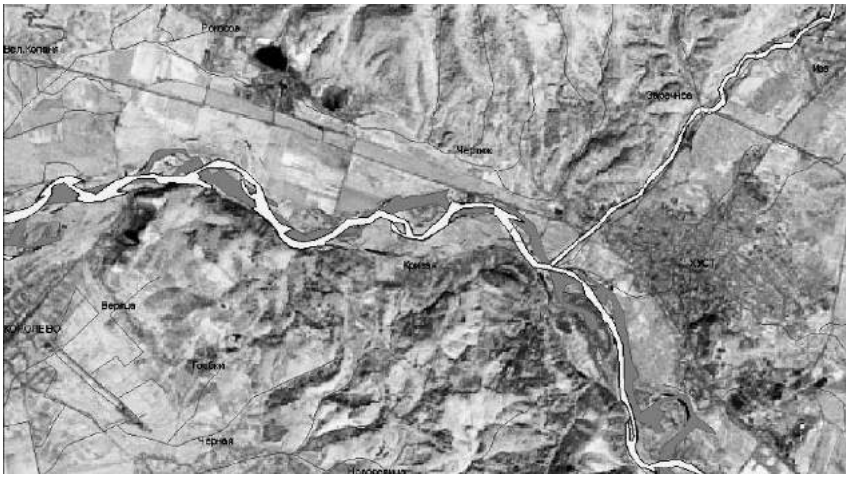



Рис. 5.56. Зміни русла р. Тиси за 20-ти річний період (темний фототон русла – виділені на основі космознімка 1980 р., світлий – за знімком 2000 р.)

Дистанційне дослідження рік постійно розвивається і знаходить застосування у моніторингу їхньої водності, паводків, льодоставів, льодоходів, запасів води у водозбірниках тощо.

### *5.4.2. Дешифрування озер*

Матеріали аерофотознімання знаходять також своє активне застосування при вивченні озер. Використовуючи прямі і непрямі ознаки дешифрування можна виділити озера різного походження – старичні, дельтові, лиманні, карстові, льодовикові, термокарстові, суфозійні, тектонічні, завальні та інші. При дешифруванні озер легко розпізнати озеро, але важче визначити його генезис. Дешифрувальними ознаками озер служать їхня форма, переважно чорний фототон, що майже завжди виразно виділяється на світлішому фоні, та навколишня географічна і гідрографічна ситуація. Для інтерпретації озер та інших водозбірників необхідні теоретичні знання з географії, геології, лімнології палеогеографії та інших наук. При визначенні генезису необхідно враховувати, що в процесі свого розвитку озера зазнають значних змін під впливом протічних вод, процесів замулення, промерзання, прогрівання, заростання, руйнування берегів тощо. Тому при дешифруванні озер особливого значення набуває вивчення всього комплексу природних умов навколишньої території.

Для визначення морфометричних характеристик озерних улоговин використовуються аерофотознімки масштабів, що відповідають розмірам водойм. За ними достатньо точно можна виміряти довжину, ширину і площу дзеркала води, довжину і порізаність берегової лінії, розміри островів, наявність та площі відмілин. Глибину озерної улоговини, а також ухил дна можна приблизно визначити за багатозональними знімками великого масштабу, на яких в коротких ЕМХ наявне проникання хвиль у воду на відповідну глибину.

***Озера старичного походження*** є закупореними з двох боків залишками алювію колишніх русел. Вони мають зазвичай характерну дугоподібну форму – форму меандри. Ці озера завжди розташовані в долині ріки, переважно на заплаві та на першій надзаплавній терасі. Розміри старичних озер бувають найрізноманітніші, бо залежать від потужності самої річки, амплітуди її меандр, тривалості та інтенсивності її формування. Русла річок, що інтенсивно меандрують, утворюють в долині багато паралельних дуг русел, міжруслових валів алювію, що формують своєрідні "віяла блукання" (див. рис. 5.53, 5.54).

*Дельтові* озера пов'язані з русловими процесами в дельтах рік, швидкістю та умовами формування дельти, кількістю завислих у воді твердих часток, умов їх транзиту та відкладення, а також від специфіки акваторії, в яку впадає ріка і при якій формується дельта. Дельтові озера утворюються поміж рукавами дельти подібно до старичних, але з участю моря, яке своєю діяльністю формує прибережні коси, що відгороджують від моря ділянки дельти і прилеглі лимани та наближені до дельт річок відмілини морського побережжя. Дельтові озера бувають різної величини, неглибокі, з островами, можуть бути замкнутими, або з'єднуватися між собою і морем невеликими протоками (рис. 5.57).

На побережжі моря, поблизу річкових дельт часто можна спостерігати "лагунні" або лиманні озера (див. рис. 5.57). Вони утворюються в нижніх течіях річок та балок внаслідок перегородження стоку їхніх вод. Така "ізоляція" відбувається природним та антропогенним способами через накопичення осадів дельти і її підвищення та внаслідок відчленовування від моря заток і гирлових частин річок наносами самих річок, з яких море формує поперечні коси, створюючи бар'єр для стоку. Характерною де-

Рис 5.57. Озера в дельті Дунаю мають різу величину, форму та орієнтацію. Сама дельта вже досить далеко висунулась в море і стала півостровом. Видно озера лиманного походження (зліва на право): Кагул, Ялпуг та Кугурлуй (пристиковане з півдня), Катлабух, які утворилися внаслідок відмежування їх дельтою Дунаю.

шифрувальною ознакою для цих озер є їхня форма витягнутого звивистого клина, розширеного до колишнього устя, іноді з відгалуженнями, також клиноподібними.

*Карстові озера* розвиваються на території, складеній геологічними породами, що піддаються розчиненню водою (гіпсами, ангідритами, крейдою, вапняками). Найчастіше такі озера бувають приурочені до широких плоских межиріч на височинах та низовинах, або пологих схилів із сповільненим поверхневим стоком. На височинах такі озера, як правило, невеличкі, з характерною для них округлою формою. Улоговини часто бувають глибокими, через що досить добре спостерігаються стереоскопічно. На низовинах карстові озера бувають різних розмірів, що залежить від розмірів водозбору та від потужності промивних розчинних пластів (рис. 5.58). Представниками такого типу озер в Україні є Шацькі озера, найбільшим та найглибшим (58 м) з яких є Світязь.

Рис. 5.58. Одне з невеликих карстових озер Шацької групи – оз. Пісочне. Озеро має дві великих та кілька малих (округлі затоки) карстових лійки. Максимальна глибина озера – 19 м. На північному узбережжі озера, на орному полі, видно малі округлої форми чагарники, які розташувалися в невеликих карстових пониженнях. При озері розташований санаторій "Лісова пісня" (південний берег), та навчальний біолого-географічний стаціонар Львівського університету ім. І.Франка (західний берег).

***Суфозійні озера*** утворюються в умовах майже плоскої рівнини чи низовини, сформованої лесовидними відкладами, які під час фільтрації поверхневих вод можуть промиватися і формувати заглибини. Найчастіше такі умови наявні на молодих(четвертинного періоду) морських низовинах. Там дощові та талі снігові води не мають стоку, а фільтруються на місці, або спливають у місцеві заглиблення, створюючи умови тривалішого та інтенсивнішого промивання і виносу вниз до водотривкого горизонту мулистих часток. Таким чином утворюються просадки, степові "поди", "блюдця"[8] або лісові "колки"[9]. В їхній центральній та найбільш

[8] Терміни вживаються в степах України.
[9] Термін вживається в російських лісостепах.

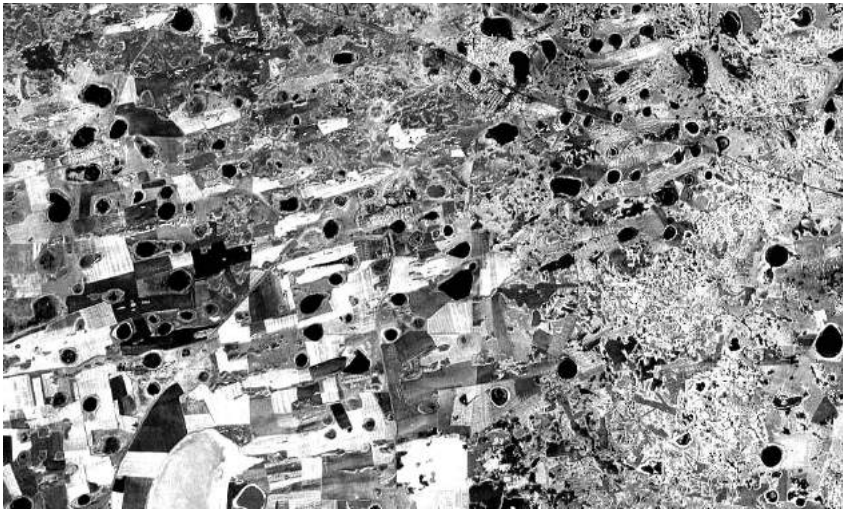
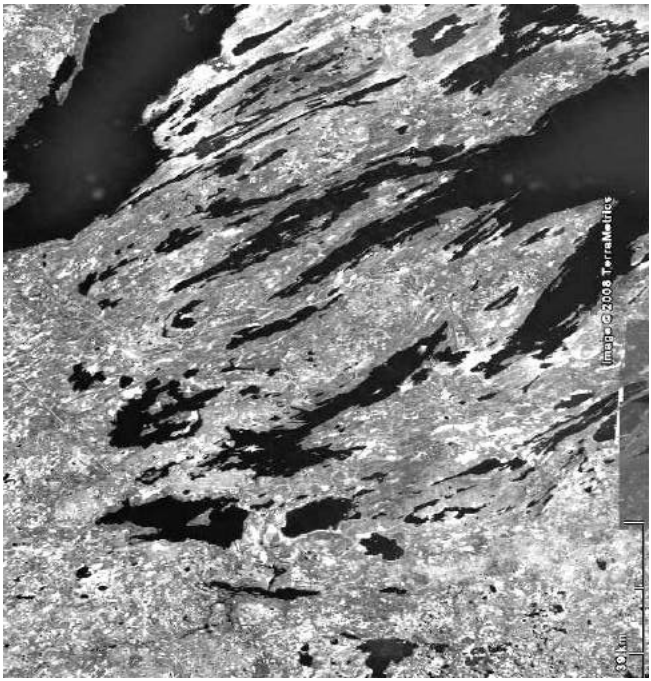


Рис. 5.59. Суфозійні озера в Ішимському лісостепу в районі Мамлютки.

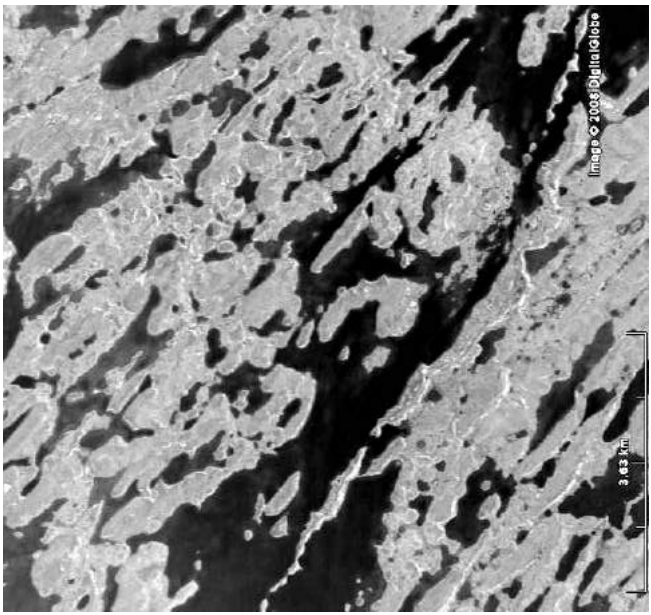
глибокій частині може тимчасово чи постійно стояти вода, формуючи тимчасові (після весняного сніготанення) або постійні озера (рис. 5.59). Чим більшим є водозбір якогось зниження, тим більше може туди зібратися води та інтенсивніше протікати суфозія, розширюючи і поглиблюючи це зниження. Найбільше суфозійних озер утворюється після весняного сніготанення. Деякі з них (малі і неглибокі) можуть влітку пересихати. Такі озера розташовані досить густо, можуть зливатися і формувати досить великі за площею озера. Дуже характерними є такі озера для південної частини Західно-Сибірської низовини, Причорноморської низовини, деяких широких терас Дніпра.

Характерними ознаками озер суфозійного походження є їхня густота, округла форма, відсутність орієнтації, наявність світлих облямівок (кілець) навколо озер, найрізноманітніші розміри (від кількох до сотень метрів і, зрідка, кількох кілометрів у поперечнику).

*Рівнинні озера давньольодовикового походження* поширені там, де активно проявлялось древнє материкове зледеніння. Це північна частина Східно-Європейської рівнини, низовини Фінляндії, Карелії, північ Канади. Вони утворюються при "виорюванні" заглибин самим льодовиком чи відторгнутими льодовиком скалами.




*б*




*а*

Рис. 5.60. Озера давньольодовикового походження:
*а* – на північному заході Гудзонової затоки у Канаді, *б* – на північному заході Онезького озера у Росії. Видно їхній загальним напрям, який вказує на напрям руху льодовика, характерну витягнутість, паралельність, об'єднання в ланцюги, з'єднання річками.

Часто котловини льодовикових озер мають інше походження, але обриси берегів були трансформовані льодовиком і загальна їхня форма набула рис льодовикових озер (північна частина Онезького озера.). Дешифрувальними рисами озер льодовикового походження можна вважати витягнуту форму їхніх котловин, орієнтацію, що відповідає напряму руху льодовика, густе їхнє розташування (скупчення), паралельність контурів озер, з'єднаність протоками та річками, невелика глибина, наявність прибережних та донних валунів, прилеглих боліт (рис. 5.60).

До озер льодовикового походження належать також реліктові міжморенні, що утворилися в котловинах, замкнутих льодовиковими валами та грядами. Такі озера мають форму, що відповідає днищу міжморенного зниження, а тому завжди оригінальну.

*Сучасні льодовикові озера* зустрічаються в гірських районах між кінцем язика глетчера (льодовика) та його кінцевою мореною, або поміж валами кінцевих стадіальних морен, що можуть

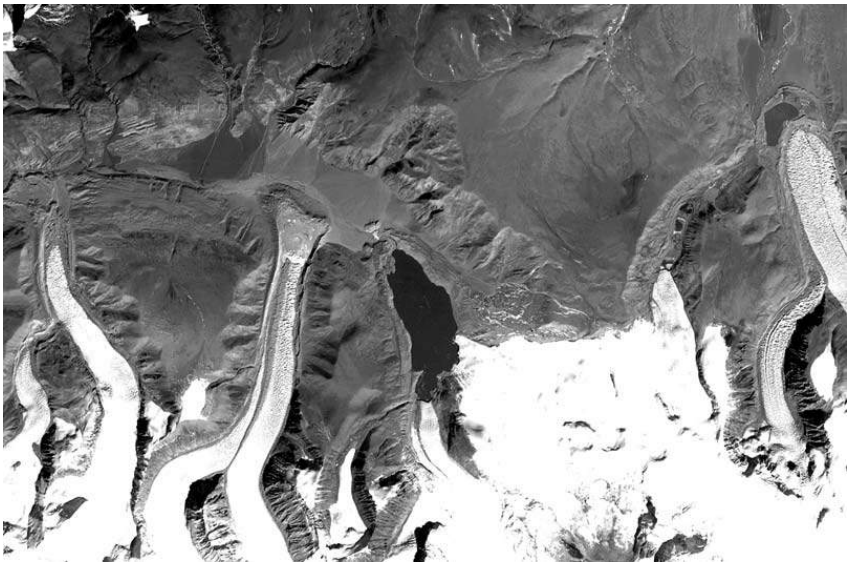


Рис. 5.61. Озера льодовикового походження і живлення приурочені до закінчень льодовиків (справа), до заглиблень трогових долин (в центрі) та до понижень поміж валами стадіальних морен в трогових долинах (в центрі і зліва). Їхній фототон чорний, темно-сірий і сірий, що залежить від глибини озер.

утворювати ланцюги озер вздовж трогової долини (рис. 5.61). В подібних умовах можуть зберігатися старі озера льодовикового походження.

В горах з альпійським типом рельєфу без сучасного зледеніння можуть тривалий час зберігатися карові озера – в днищах карів – місцях формування глетчерів. Такими є озера Татр та Чорногори в Карпатах (Несамовите, Бребенескул та ін.) Вони, переважно, невеликі, займають найглибші ділянки днищ древніх карів, мають постійне ґрунтове, снігове та дощове живлення. Розвантаження води відбувається через донну морену без видимих потічків, або через потічки, що обминаючи моренний вал, течуть в долину. Виходячи з поданого опису дешифрувальними ознаками карових озер є: розташування в карах, округла або дугоподібна форма, що узгоджується з просторовими формами дна кару і моренних валів, прилеглість до крутих стінок карів, часта наявність на прилеглих схилах сніжників, стадіальні вали морен, або рігелі, потічок від озера. Карові озера мають різну глибину і , як правило, дуже чисту воду, а тому при невеликих глибинах дно може просвічуватись через товщу води. Ймовірне також заростання карових озер сплавиною, якщо воно достатньо мілководне і прогрівається.

Озера термокарстового походження поширені тільки в регіонах поширення багаторічної мерзлоти. Як правило, вони невеликі, округлої та різноманітних форм, зустрічаються скупченнями на рівнинах з можливими активними таненнями мерзлоти.

*Водозбірники* мають значне розповсюдження і важливе господарське значення, а тому налагодження систематичних спостережень за їхнім станом обов'язкове. Водозбірники облаштовують для регулювання стоку води, для акумуляції води перед гідроелектростанціями, тепловими та атомними електростанціями, для водопостачання промислових процесів, побутових потреб населення, для поливання сільськогосподарських полів і в подібних ситуаціях. Водозбірники формують внаслідок перегородження дамбами русел рік і річок, іноді балок (рис. 5.62). Межі наповненого водозбірника залежать від висоти дамби. Після створення водозбірника останній функціонує подібно до природних озерних водойм, але з сильним впливом господарського втручання людини. При активному господарському втручанні у водний режим

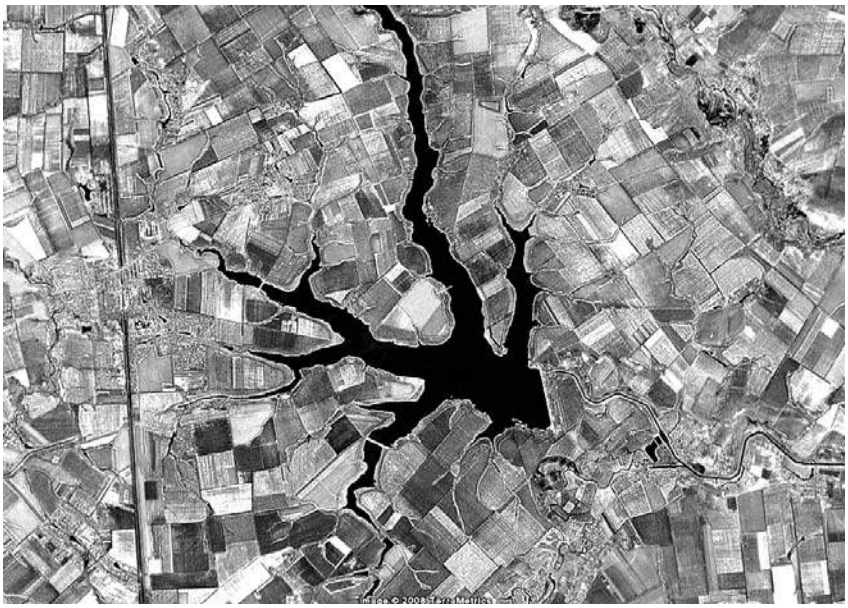


Рис. 5.62. Водозбірник на каналі Дніпро-Донбас в Харківській області, сформований дамбою, побудованою нижче від злиття кількох балок, що обумовило його форму. Сільськогосподарські поля практично контактують з берегами водозбірника. Зліва – дорога Харків – Лозова. Справа зверху – долина річки Берека.

водозбірника потрібен відповідний його догляд і регулювання небажаних процесів.

Істотну допомогу в цьому можуть надати методи дистанційного дослідження. Вони допомагають у визначенні площі, глибини, запасів води, замуленості водозбірників, їх заростання донними та плаваючими водоростями, зміни берегової лінії, формування берегового прираю, дискового льоду, льодоставу, товщину льоду, скресання льоду, льодоходу. Можливість отримання таких даних в найкоротший термін є дуже суттєвою, бо дозволяє максимально правильно та швидко оцінити ситуацію та відповідно реагувати у необхідних випадках.

Наприклад, використання матеріалів аерофото- чи космічного знімання дає можливість отримати кількісні характеристики переробки берегів на великому протязі, прогнозувати подальший хід і темпи переробки берегів водосховищ.

Великі водозбірники створюють на великих ріках, що мають широкі заплави та багато допливів. Однак, і проблеми, що появляються разом з створенням великих водозбірників також більші і при відслідковуванні їхніх проявів дистанційні методи дослідження стають незамінними. Великі водозбірники стають базисом ерозії для верхньої частини ріки, що входить у водозбірник, а тому ця ріка формує тут своє проміжне гирло, закупорює своїми наносами верхню частину водозбірника, може, навіть, формувати проміжну дельту з рукавними розгалуженнями. Вище по течії, внаслідок сповільнення течії русло створює нові рукави, при весняному повноводді заповняє старі рукави, створюючи мереживо дрібних русел та заболочення заплави. Всі ці явища добре видні

Рис 5.63. Космознімок найбільшого в Україні Кременчуцького водозбірника, створеного в 1959 – 1961 роках. Довжина його – 149 км, максимальна ширина – 28 км, максимальна глибина – 25м, площа 2250 км$^2$. Добре видно підтоплення лівого берега водозбірника гирла лівої притоки (р. Сули) і самого Дніпра, в долині якого утворилося мереживо рукавів, стариць та островів. Темна вузька смуга вздовж лівого берега долини правої притоки р. Тясмин (паралельна до збірника на його правому березі – ліс, на північному закінченні якого Черкаси, а на південному – Чигирин.

на дистанційних знімках, легко (через свою виразність) віддешифровані та можуть бути належно інтерпретовані (рис. 5.63).

### *5.4.3. Дешифрування морських узбереж*

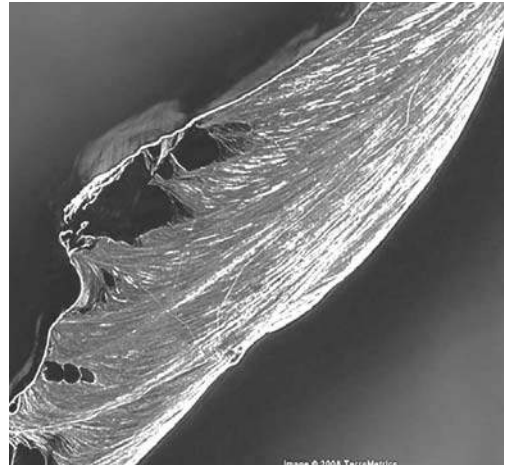
За допомогою аерофото- та космознімків можна проводити також вивчення поверхні великих об'єктів гідрографії на значних площах, отримувати детальні і об'єктивні результати, фіксувати явища, часто недоступні для спостережень з суші або з корабля. У зв'язку про цим аерокосмометоди в даний час знаходять широке застосування в океанографічних берегових роботах. Методи дистанційного зондування застосовуються під час вивчення процесів формування берегів та картографування рельєфу дна мілководних прибережних ділянок.

У прибережній смузі чітко фіксують напрями морських течій. Прямими їхніми ознаками служать симетричні за поперечною послідовністю смуги фототонів, деякі форми морського дна, пояси каламутної води, зміна кольору води, наявність, орієнтація та простягання прибережних морських кос і відмілин. Всі ці ознаки дозволяють визначити лише напрям течії, проте мало придатні для встановлення її швидкості. Течії виявляють на знімках за непрямими ознаками, такими як переміщення пухкого матеріалу, що створює витягнуті акумулятивні відмілини, підводні пасма, вали, надводні коси, бари (рис. 5.64).

Потоки каламутної води відповідають поверхневим і глибинним течіям. Вони можуть формуватися в прибережних водах від вітрового хвилювання та прибійного розмивання берегів, або виноситися в море ріками. Оскільки каламутна вода, що виноситься в морі ріками, добре відрізняється за своїм фототоном від морської води, то ці виноси легко розпізнати.

Аналіз великомасштабних знімків порівняно легко дозволяє дешифрувати характер ґрунтів морського дна на мілководих ділянках. Чорно-білі аерофотознімки дають можливість виділення наступних типів ґрунтів: скельні (плита), камінь, валуни, галька і щебінь, пісок, мул, детрити черепашок. При цьому слід приймати до уваги непрямі геоморфологічні ознаки, оскільки кожен літологічний тип відкладів виникає і існує, як наслідок взаємодії берегових порід, моря та річкових наносів, які перевідкладаються морем.

*а*



*б*

Рис. 5.64. Акумулятивні форми узбережжя Азовського моря: *а* – коса Бирючий Острів, коса Арабатська Стрілка та затока Сиваш. Видно прибережні відмілини та забруднення. Орієнтація кіс відповідає напряму кругової течії – проти годинникової стрілки; *б* – збільшений фрагмент закінчення коси Бирючий Острів. Розпізнають дуги грив, якими "наростала" коса. Вони формуються на внутрішній частині її дуги в "тіньових" завихреннях течій, що відкладають намули. Там продовжують утворюватись нові відмілини і бари (світло-сірі плями у воді та білі лінії над водою), що відгороджують від моря частинки акваторій, утворюючи озера на косі.

Зображення скельних ґрунтів (плити) відрізняється великою чіткістю, завдяки тоновому контрасту з навколишніми просторами. Іноді на поверхні плити спостерігаються тріщини і розломи, зазвичай зайняті підводною рослинністю, що робить їх дуже чітко видними на знімку. Окремі скелі і великі брили (кам'янисті ґрунти) зображаються на знімках відповідно до їхніх розмірів і форм. Часто вони формують своєрідні ланцюжки, що продовжують висунуті в море скелясті масиви. Підводні камені та скелі зображаються як плями різних розмірів та форми, що виразно виділяються на тлі дна. Їхній фототон вельми різний (від чорного до білого).

При наявності стабільних течій вздовж берегів та при виносах ріками в море своїх намулів у прибережних водах можуть формуватися відмілини, бари та надводні коси. Матеріалом для їхнього формування може бути пісок, детрити ракушняка чи намули з водоростями. У цих випадках акумуляція матеріалу часто буває викликана наявністю якихось підводних перешкод: скелястих гряд, штучних загород, молів, причалів, що створюють гідродинамічну тінь. Роль перешкод, до яких приурочена акумуляція, можуть виконувати і зарослі водоростей, що добре розрізняються на знімку за їхнім характерним плямистим струменево-зернистим малюнком темніших тонів.

Ділянки поширення валунів на прибережних мілководдях пізнають на знімках за характерним зернистим малюнком світлого тону.

Серії підводних валів зазвичай бувають сформовані пісками. Піщані підводні вали відрізняються чіткою морфологічною вираженістю і приуроченістю до акумулятивного побережжя. Зображення піщаних відкладів на знімках характеризується рівним світлим фототоном.

Мулисті відклади, що залягають на мілинах, мають подібний до піщаних сірий або темно-сірий фототон, обумовлений природним забарвленням та товщею води. Мулисті відклади часто просвічують в товщі води (рис. 5.65).

Межі ареалу глинистих відкладів переважно не бувають виразними. Великі скупчення черепашкового матеріалу часто бувають приурочені до ділянок з високою гідродинамічною активністю вод. У цих випадках розвиток підводної рослинності утруднений. Тому

Рис. 5.65. Фрагмент Керченської протоки. Вздовж південного берега Таманського півострова (Росія) дешифрують темну смугу кругової течії Чорного моря (проти ходу годинникової стрілки). Видно штучні дамби по периметру Таманського півострова, що сприяють акумуляції намулу та нарощенню півострова. Північніше Таманського півосторова просвічують мілини. Поперек протоки прокладена нова дамба в напрямку українського острова Тузла. За цією дамбою видно вихрові течії та відмілини, а поміж дамбою і островом Тузла – сильний струмінь, що розмиває острів. Вертикальна біла лінія – давня демаркаційна лінія поміж Україною та Росією.

ділянки, зайняті детритами черепашок, характеризує світлий фототон, що різко контрастує з навколишніми просторами.

Контрастно, переважно світлими тонами зображаються морські причали, моли та спеціально насипані чи бетоновані дамби.

Дистанційні методи дозволяють також слідкувати за міждержавними діями на пограничних територіях. Використовуючи та підсилюючи сприятливі природні процеси (течії, речовинні міграції) можна суттєво впливати на свої та сусідські акваторії та території. Прикладом цьому може бути неузгоджене міждержавне будівництво дамби від російського півострова (Таманського) до українського острова Тузла (див. рис. 5.65).

Інструментальна обробка аерофотознімків на стереофотограмметричних і фотометричних приладах дозволяє отримувати дані про глибини біля берегів, особливості морського хвилювання. Ці дані мають величезне практичне значення. Відомості про глибини дозволяють значно скоротити дорогі вимірювальні роботи і отримувати карти рельєфу прибережного мілководдя в камеральных умовах.

При дослідженні приполярних морів на космічних знімках дешифрують шельфові льодовики, що сповзають у море, тріщини відколювання, обвалення льоду у воду та льодовикові язики (див. п. 5.9). Визначають вік, товщину, монолітність чи тріщинуватість, торосистість, рухливість берегового льоду (припай або лід, що дрейфує). Важливим завданням сучасного космічного моніторингу прибережних смуг є дослідження формування айсбергів, їхнє відколювання від тіла льодовика і шляхи руху біля узбережжя та на акваторіях.

## 5.5. Інтерпретація рослинного покриву

За останні 50 років виконано дуже багато досліджень з метою впевненого діагностування рослинного покриву. Однак, через велику кількість факторів, що впливають на відбиття сонячної радіації, чи на власне випромінювання рослинного покриву, через складність теорії відбиття сонячної радіації рослинами, а, головно, через надзвичайно велику різноманітність рослинних ценозів та їх фенофазних і ситуаційних станів до тепер не можна вважати справу ДДЗ рослинності повністю вирішеною, тим більше для автоматичного дешифрування. Остання названа проблема потребує для свого втілення створення математичних моделей відбиття сонячної радіації системою "рослинність – ґрунт", а це, в свою чергу, вимагає не тільки розроблення теорій відбиття сонячної радіації різними фіто- та ґрунтовими поверхнями, а й проведення безлічі натурних експериментів з вимірюваннями потоків складових радіаційного балансу в різних ценозах при типових і нетипових їх станах для верифікації віднайдених залежностей та формул.

На даний час уже розроблено й опубліковано багато моделей (Гоудріана (Goudrian - 1977), Суітса (Suits - 1983)? Росса (1983 та ін.), що використовували різні спрощення натурних ситуацій, однак реальність залишається незрівнянно різноманітнішою. Тим не менше, автоматичне дешифрування матеріалів ДДЗ на простому рівні (розрізнення лісів, луків, пасовищ, ріллі, посівів і т.п.) вже давно виконується з високою долею ймовірності.

### *5.5.1. Спектральний образ рослинності на космознімках*

*Фактори, що визначають оптичні властивості фотоелементів.*

Поверхня листя є майже прозорою для сонячного проміння в зоровому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Пройшовши через поверхневий шар листка промені входять в багатошарову м'яку частину листка де відбувається взаємодія ЕМХ з тканинами: вбирання сонячної енергії, її перетворення та селективне відбиття.

Фундаментальними дослідженнями біофізиків встановлено, що основними чинниками, які визначають формування потоку ЕМХ *оптичного діапазону (400–700 нм)* від рослинного покриву є вміст пігментів та води в тканинах фітоелементів, а також морфологічна будова рослинного покриву. Найважливіше значення в цьому стосунку має концентрація хлорофілу та каротиноїдів. Вони обумовлюють вибірковість поглинання та відбивання хвиль оптичного діапазону. Внаслідок цього для зелених рослин формується специфічна крива спектральної яскравості (спектральний образ), з двома мінімумами (поглинання) в синій та червоній ділянках спектру та значним зростанням розсіювання в інфрачервоному діапазоні. В цілому, відбиття зеленими рослинами, ЕМХ (особливо деревними видами) у зоровому діапазоні є досить низьким (до 25%), через що і очі людей, і фотоапарати сприймають ліси як об'єкти темні.

Найбільше хлорофілом поглинаються промені голубого (0,40–0,48 мкм) та червоного (0,6–0,7 мкм) діапазонів ЕМХ, які використовуються рослинами для фотосинтезу нової органічної речовини. Довжини хвиль зеленого діапазону сильно відбиваються хлоропластами живих рослин, через що на малих віддалях бачимо їх зеленими (рис. 5.66).

*В ближньому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні (700–1300 нм)* розсіювання та випромінювання обумовлюється поверхнею та внутріш-

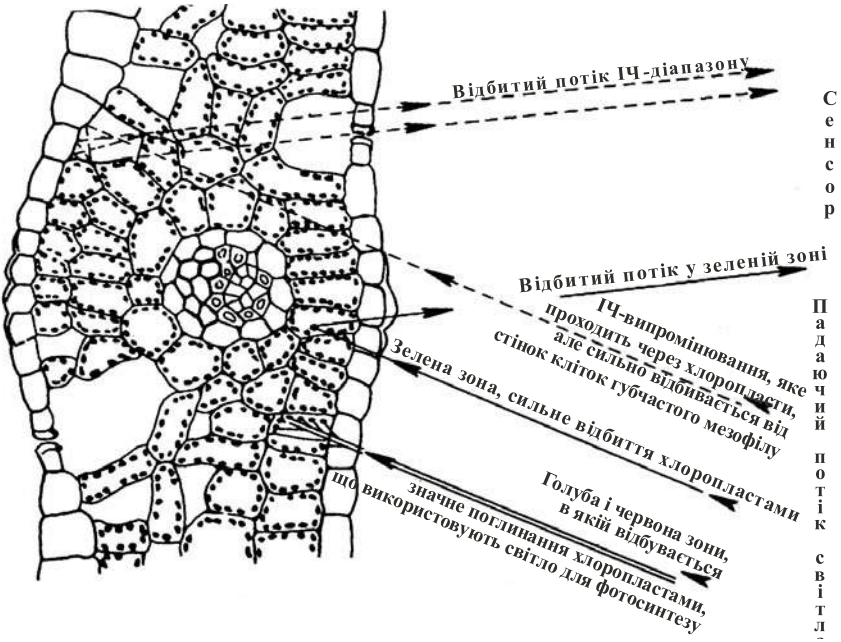



Рис. 5.66. Відбивна, вбирна та пропускна здатність живого листка для потоку сонячного світла у зоровому та ближньому інфрачервоному діапазонах [68].

ньою структурою тканин рослин. В ближній частині ІЧ – діапазону (0,7–1,3 мкм) більша частина потоку сонячної енергії відбивається від листка. Залежно від виду рослин ця величина може складати від 30 до 70% всієї енергії проміння що прийшла від Сонця.

Розсіяння обумовлюється, переважно, внутрішньою структурою тканин. Проникаючи у міжклітинний простір та в клітини "м'якуша" листя, промені долають мембрани клітин, розсіюючись та відбиваючись, що обумовлюється заломлюючими властивостям мембран клітин. Процес відбиття, заломлення та поглинання багатократно повторюється і набуває найбільшого значенні в тих рослин, що мають складнішу будову листя, в яких мембран є більше, і в яких вони мають більшу сумарну поверхню. Саме це багатократне повторення відбиття і розсіювання світла мембранами клітин листя є причиною посиленого потоку ЕМХ інфрачервоного діапазону, особливо в ближній його частині.

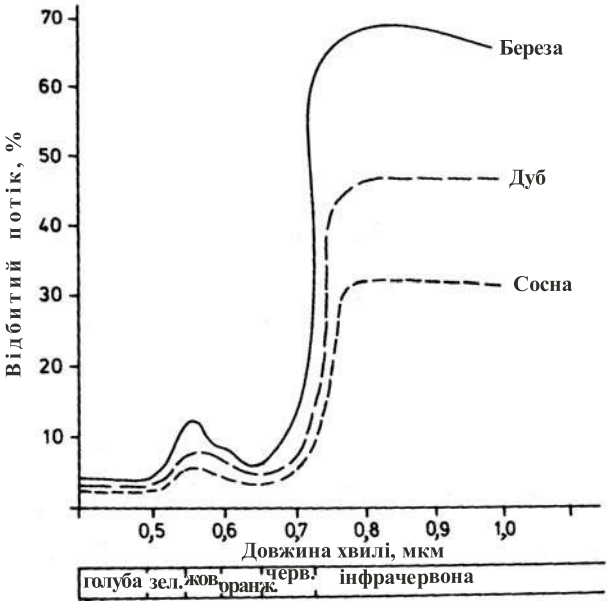



Рис. 5.67. Спектральна відбивна здатність сосни, дуба і берези (за Бакстремом і Віландером, [68]).

На графічних зображеннях спектральної відбивної здатності зелених рослин видно, що після високого сплеску відбиття ЕМХ на початку інфрачервоного діапазону спостерігається деяке його вирівнювання і утримання на максимальній висоті – так зване "плато". Воно характерне для всіх рослин і має важливе діагностичне значення, бо власне висота цього плато, тобто висота сплеску і рівень поверхні плато є різним для різних рослин та їх станів). Так, рослини, що візуально сприймаються темнішими, мають нижчу випромінювальну здатність в інфрачервоних хвилях, ніж світлі рослини. Це саме стосується рослин одного виду при їх різних рівнях життєвості, при їх захворюваннях, чи при сезонних та фенофазних змінах (рис. 5.67).

Зорові відчуття цих станів може фіксувати й людське око, що не сприймає ІЧ хвиль, а тому може розрізняти життєвість рослин, їх мінеральне голодування, пошкодження, зрілість чи незрілість плодів. Це суб'єктивні оцінки, а тому наземне зондування станів

рослинності за спеціальними вимірюваннями і дистанційне зондування з повітря та космосу є підставою для вироблення методів автоматичного дешифрування за відповідними зразками та моделями.

*В середній і дальшій частинах інфрачервоного діапазону ЕМХ (1,3–2,5 мкм)* інтенсивність розсіювання знову понижується. На кривих спектрального образу рослинних об'єктів для різних живих рослин вирізняються два характерних мінімуми яскравості, що пов'язані, як виявилося, з зонами поглинання, характерними для води. Це означає, що ці зони поглинання і зменшення яскравості краще виражені у рослин з більшим вмістом води у листі, а для рослин одного виду чи, навіть, однієї особини, виразність означених мінімумів зменшуватиметься при зменшенні забезпечення рослини вологою та при її в'яненні чи висиханні, що використовується для діагностування водного голодування.

Сухі і відмерлі рослини дещо змінюють свій спектральний образ, виявляючи повну, чи майже повну відсутність мінімумів поглинання, пов'язаних з водою в ІЧ-діапазоні, дещо більшу яскравість в оранжевому та червоному діапазонах, та швидке, але не стрибкоподібне збільшення випромінювання в ближньому інфрачервоному діапазоні. Ця закономірність дозволяє визначати дозрівання врожаю зернових культур, старіння і відмирання рослин (рис 5.68, 5.69).

Спектральні характеристики багатьох рослин змінюються протягом періоду вегетації через зміни форми, розмірів, товщини листків, зміни в структурі листка, зміну концентрації піґментів, зрештою, забрудненості листя.

Різниці спектральних характеристик рослин в різні сезони року можуть змінюватися, бути виразними, чи завуальованими. У зв'язку з цим постала необхідність вивчення спектральної яскравості рослинних об'єктів протягом усіх сезонів, природних фенофаз, природної динаміки життєдіяльності рослин від їх появи, проростання у формі сходів до відмирання, руйнування і розкладу. Така робота виконується, проте багатоманітність ситуацій вимагає продовження та ускладнення вимірювань, виходячи не тільки з особливостей рослин, як біологічних видів, а й з врахуванням впливу субстрату, специфіки живлення, топокліматичних умов, орографії, та антропогенних чинників.

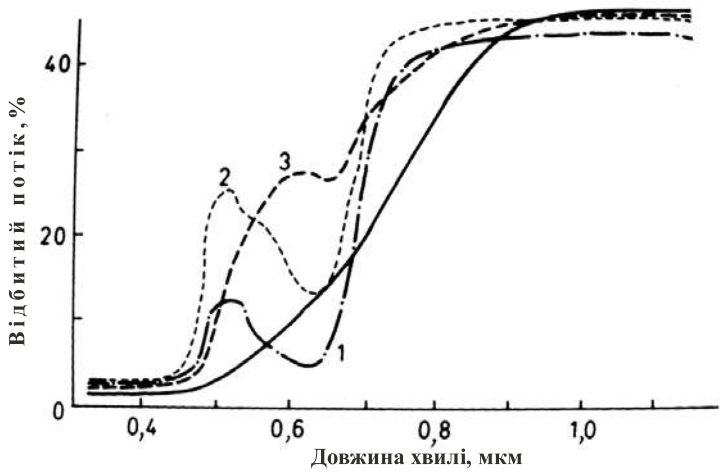



Рис. 5.68. Зміна спектральної відбивної здатності листя протягом вегетаційного періоду:
1 – живі листки; 2, 3 – рання і середня стадії розвитку листя; 4 – відмерле листя [92].

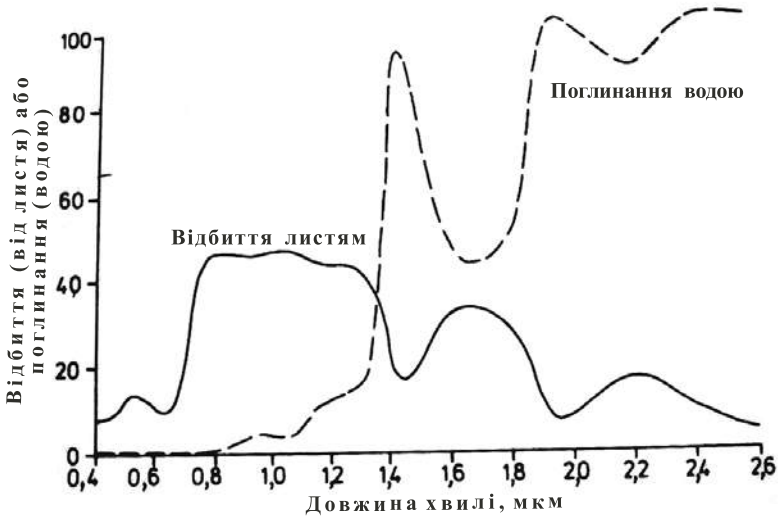



Рис. 5.69. Спектральна відбивна здатність здорового листя і спектральна здатність поглинання ЕМХ водою [109].

Розглянуті вище закономірності розподілу потоку сонячної енергії рослинами проявляються і для окремо взятої пластинки живого листка, і для цілих рослин, і для рослинних ценозів, і для рослинного покриву в цілому. Розрізняються криві спектрального образу названих елементів рослинного покриву не формою, а величиною спектральної яскравості для тих довжин ЕМХ, в яких здійснюється порівняння. Власне ці криві спектральних образів є підставою для дешифрування рослинності за багатозональними знімками.

***Вплив зовнішніх факторів на спектральні характеристики рослин***

Вище ми подали опис впливу природних особливостей самих рослин та умов, що впливають на формування відбиття, проникнення та перетворення сонячних променів під час їхнього контакту з рослинністю. Однак, наголошуємо на дуже важливому зовнішньому чиннику, який перебуває в постійній зміні – це кут падіння сонячних променів. Протягом кожної доби і протягом року висота Сонця змінюється, а значить кут падіння сонячних променів також не є постійним. Особливо важливого значення це набуває при формуванні елементів (листових пластинок, стебел, гілок) рослинного покриву під певним кутом і експозицією. Знімальна апаратура також має і змінює при польоті носія апаратури свій кут візування конкретного пункту. В цьому зв'язку важливим є співвідношення кутів падіння сонячних променів, кута візування стосовно площин загальної поверхні рослинного покриву та кутів розташування поверхонь окремих рослинних елементів. Саме в ситуації цього змінного співвідношення кутів реагує рослинність на потоки ЕМХ.

Крім цього постійно змінюється інтенсивність сонячної радіації через зміну товщі атмосфери, яку пронизує проміння Сонця при різних кутах його падіння на поверхню Землі, через забрудненість атмосфери, насиченість водяною парою, хмарами різної форми, товщини і структури.

Розвиток та фізіологічний стан рослин і фітоценозів залежать від ряду зовнішніх факторів. Найважливішими з них є тип ґрунту, насиченість його поживними сполуками, наявність вологи в доступній для рослин формі, повітряне дихання ґрунту, сонячна радіація, навколишній простір з його наповненням.

Встановлено, що зміна спектральних властивостей листя може бути прямо пов'язана із відносним вмістом тих чи інших металів у ґрунті (це стосується і важких металів). Саме цей ефект вже вико-

ристовується геологічною розвідкою для дешифрування ареалів з аномальними змінами спектральних коефіцієнтів яскравості (СКЯ) рослин на місцях аномального збагачення металами для пошуків цих металів. Прояв цих аномальних характеристик СКЯ може відбуватися на різних фенофазах в трав'яних рослин, а також різні рослини володіють певно. Вибірковою здатністю що до поглинання тих чи інших металів. Відомо, що в хвої і вітках хвойних порід дерев концентрація металів при однакових умовах розташування менша, ніж в листяних дерев. Більше того, виявлено, що зміна спектральних характеристик листя може бути прямо залежна від вмісту металів у ґрунті, хоч концентрація металів у листках може бути не збільшеною. Пояснюють це зміною кількості води та концентрації хлорофілу в листках, що виникають внаслідок впливу підвищеної концентрації металів у ґрунті. Особливо виразно подібні зміни впливають на спектральну яскравість листя при його старінні, тобто в пізній літній та осінній періоди.

Крім сказаного додамо, що рослини, які живуть в несприятливих для себе умовах, або є з інших причин пригніченими та хворими відрізняються від здорових рослин цього ж виду дрібнішим листям, меншим ростом, а значить меншою сумарною площею листя, що безпосередньо викликає зміну їх спектральних характеристик яскравості. Більше того, сповільнений розвиток рослин в цих умовах зменшує проективне покриття рослинами свого субстрату (ґрунту, лісової підстилки, степової повсті, торфу) через що він активно вступає в формування потоку ЕМХ від земної поверхні, бо це якраз ті поверхні, що характеризуються підвищеною здатністю розсіювання та випромінювання саме в інфрачервоному діапазоні хвиль, чим уподібнюються до сухих рослин. Через це для виявлення стану рослин та впливу субстрату необхідним є порівняння показників яскравості у зоровій та в ближній ІЧ частинах спектру ЕМХ, де легше вирізнити живі рослини, з яскравістю в середній та далекій підзонах ІЧ хвиль.

Важливо знати, що зміни спектральних характеристик листяних дерев є більш вираженими, ніж у хвойних. Останні протягом усіх пір року поглинають сонячну енергію у зоровому та ближньому інфрачервоному діапазонах (відповідно 95% і 65%) сильніше, ніж інші рослини, відносно більше розсіюючи зелені промені. Саме тому ми їх бачимо як "вічнозелені".

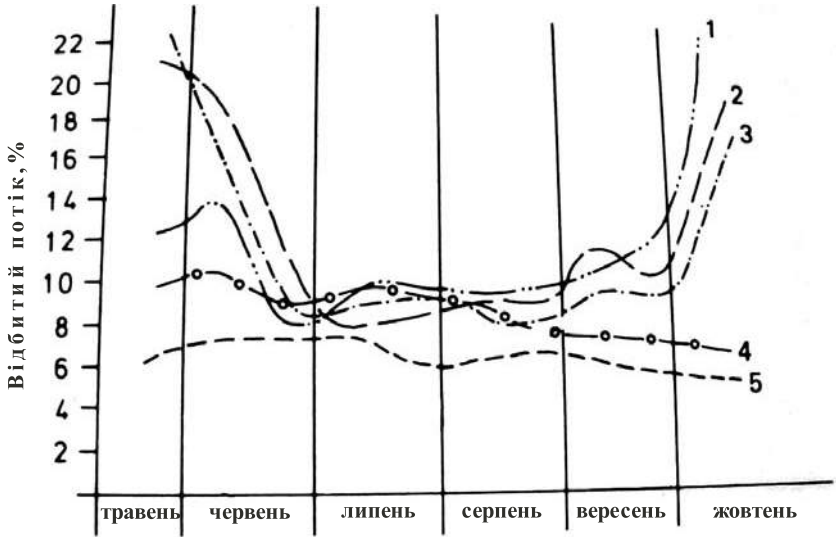



Рис 5.70. Зміна відбивної здатності різних дерев протягом року:
*1* – осика, *2* – дуб, *3* – бук, *4* – сосна звичайна, *5* – сосна кедрова
(за Brothers G.L.&Fish D.B., 1978 [68]).

При старінні листя дерев та трав проходить зміна їхньої піґментації, зменшення вмісту води, руйнування мезофілу через розпад хлорофілового піґменту. Це викликає зниження поглинання світлового потоку особливо в червоній частині спектру і посилює відбиття в зеленій частинах спектру. Поглинання променів у голубій зоні продовжується завдяки іншим піґментам листя. Саме через змішування селективно підсиленого розсіювання зелених і голубих, а також червоних хвиль поверхнею та піґментами листя в період старіння листя наші очі бачать його жовто-зеленим, жовтим, або червоним. Зрештою, такі ж кольори формуються на ізопанхромних[10] фотоматеріалах

При наступних стадіях старіння листя, що супроводжується втратою вологи, руйнуванням клітин і хлорофілу з’являється значне підсилення відбиття в червоному та ближньому діапазонах (рис. 5.70).

[10] Ізопанхромні фотоматеріали – володіють прямою правильною передачею всіх кольорів з деяким пониженням чутливості у зеленій частині спектру.

Під час аналізу спектральної яскравості рослинного покриву, який складається з кількох ярусів (чагарники та ліси) слід враховувати, що потік сонячних променів по різному проникає через товщу рослинності. Частина променів відбивається вже від поверхні крон, частина від елементів рослинності в її товщі, а частина від земної поверхні. Відбиття від поверхні крон (крім біологічної специфіки рослин) обумовлена також:

- вирівняністю чи нерівністю цієї поверхні і власним затіненням одних елементів рослинності іншими;
- варіантами орієнтації листя та гілок, їхньою вібрацією, сформованими вітром;
- зімкнутістю крон та її модифікаціями, залежними від вітру і пружності скелетних органів дерев.

Верхні листки крон дерев, кущів чи трав'яного покриву пропускають більшу частину інфрачервоних променів. Вони пройдуть (листя для цих променів майже прозоре) в товщу рослинного покриву, відіб'ються від його грубіших елементів чи від поверхні землі і ще раз пройдуть через листя поверхні крон вже як складова частина випромінювання, що формується діяльним шаром, чим підсилить інфрачервону складову. Цьому сприятиме висока проникність листя для хвиль інфрачервоного діапазону.

Застосування багатозональної сканерної апаратури високої роздільної здатності в середній частині ІЧ-діапазону суттєво розширило можливості діагностування характеристик рослинності, визначення і розрізняння рослинних ценозів. Так, 500–канальний спектрорадіометр, розроблений Коллінзом, дає можливість проводити вимірювання в дуже вузьких ділянках спектру ЕМХ при малих змінах спектрального відбиття рослинного покриву у зоровому, інфрачервоному ближньому та середньому діапазонах ЕМХ. Це дозволило започаткувати нову методику біогеографічних вимірювань. Застосування комп'ютерів дозволяє справитись з аналізом такого великого потоку даних і зробити суттєвий прогрес в дешифруванні характеристик рослинного покриву, а також тих умов, яку він індикує.

***Вивчення структури рослинного покриву***

Застосування космічних знімків суттєво вплинуло на якість картографічних матеріалів, що представляють рослинний покрив за загальними та спеціальними параметрами, особливо у

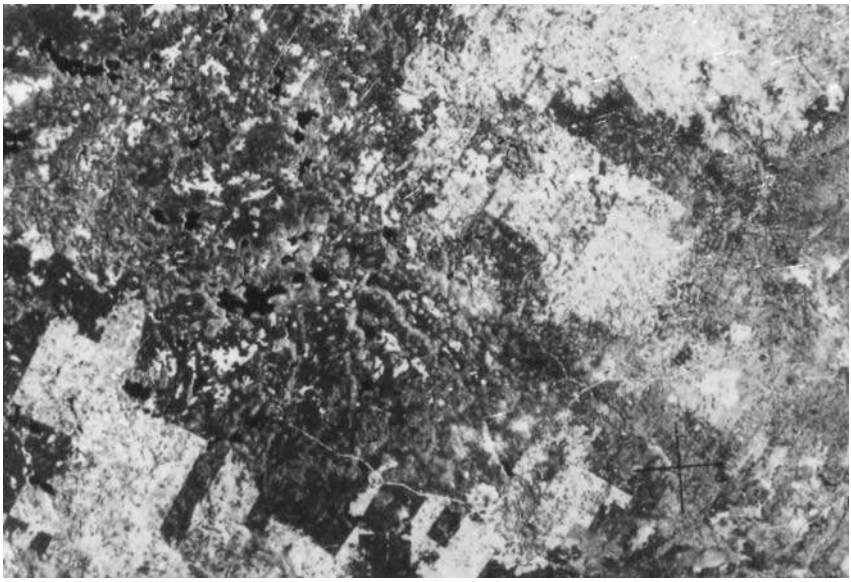


Рис. 5.71. Зображення рослинного покриву на території з нестабільним лісовим та сільським господарством (Валдайська височина). Видно: темні та світлі контури геометричних форм – сільськогосподарські поля (рілля і перелоги); темно-сірі зі світлими плямами – мішані ліси з переважанням хвойних порід дерев; світлі контури з темними плямами – листяні ліси (береза; чорні плями – озера).

недоступних та слабовивчених регіонах. За допомогою різних матеріалів ДДЗ складені середньомасштабні та великомасштабні карти тундрової рослинності в районах її інтенсивного геологічного освоєння, карти прибережних районів, що систематично затоплюються, карти напівпустинних регіонів з метою пошуку пасовищ і визначенням біомаси рослинного покриву, карти лісів тайгової зони з визначенням породного складу та віку лісів (рис. 5.71).

В цілому, уточнення геоботанічних карт, виконаних наземними методами, та створення нових карт за матеріалами ДДЗ на ще не закартографованих територіях, дозволило ліквідувати "білі плями" на геоботанічних картах і створити якісно кращі карти геоботанічного районування на величезні території.

Особливого значення набуло застосування матеріалів ДДЗ *в сільському господарстві*. Матеріали ДДЗ дають можливість розріз-

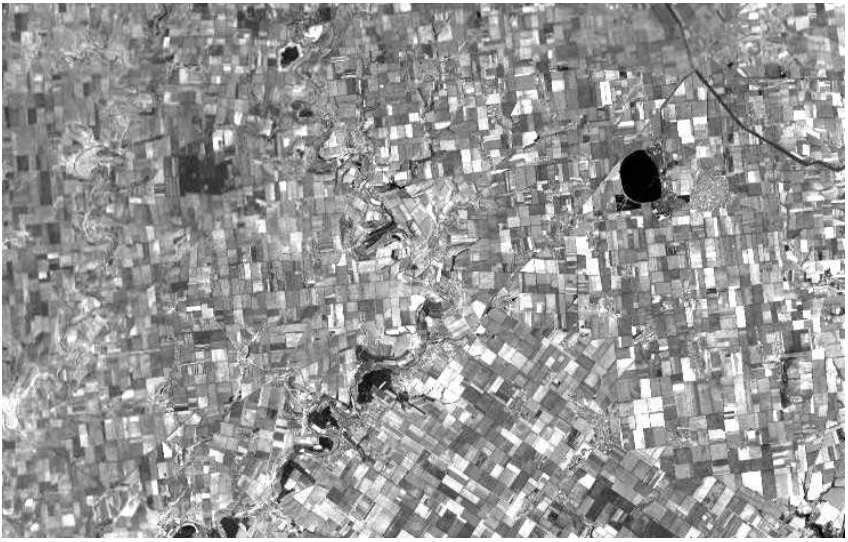


Рис. 5.72. Територія зі значним сільськогосподарським освоєнням (Середньо-Руська височина в межах України). Фототон полям надають рослинні культури та оранка. Видно слабо розорані долини рік.

нити і картографувати ділянки з різними типами сільськогосподарського використання (ріллю, посіви трав, посіви зернових, просапних і технічних культур, розпізнати посівні культури, пасовища, перелоги і т. п.), а також визначити площі земель, зайняті під різні сільськогосподарські угіддя, культури, чи під специфічні використання.

Застосування апаратури з високою роздільною здатністю в кількох підзонах зорової та інфрачервоної зони спектру ЕМХ дозволяє крім визначення площ, зайнятих під різними сільськогосподарськими культурами, оцінити їхній стан на різних фенофазах, відстежувати динаміку біомаси, прояви захворювань, пошкодження шкідниками, водне забезпечення в посушливих умовах, ймовірне "голодування" на поживні елементи, забур'яненість, контроль за агротехнічними заходами, що в комплексі дозволяє вирішувати задачі прогнозування врожайності цих культур.

Дуже успішним був експеримент PLACIE з прогнозування урожайності за один місяць до жнив, проведений спільно Міністерством сільського господарства США , NOAA NASA з вико-

ристанням матеріалів супутників "Лендсат" ще в 70-х роках минулого століття. Цей експеримент показав високу точність прогнозування зернових на всій піддослідній території, а особливо на території Радянського Союзу, для якої попередня оцінка врожайності співпала з реальними кінцевими показниками з відхиленням в межах 6%. Для Канади і США погрішність складала відповідно 15% і 20%, що було пояснено більш дрібною нарізкою полів та їх нерегулярністю.

В теперішній час для України матеріали ДДЗ можуть активно використовуватись для інвентаризації земельних угідь, оперативного внесення змін в оцінку стану земельних ресурсів через їхнє використання не за призначенням, забур'янення, заростання самосівними деревними видами рослин.

*В лісовому господарстві* набутий значний досвід використання матеріалів дистанційних знімань для картографування лісів, визначення складу порід, запасів деревини, тобто тих завдань, які традиційно вирішуються трудомісткими наземними лісотаксаційними методами з регулярністю 5–10 років. Застосування дистанційних методів дозволяє у 3–5 раз зменшити затрати на такі роботи, суттєво скоротити наземні роботи при повторних лісотаксаціях, навіть переглянути методи лісовпорядкування. Особливо важливим в цьому стосунку є можливість швидкого внесення коректив у карти лісовпорядкування за умови появи вигорілих площ, картографування ділянок буреломів та вітровалів, а також ділянок суцільних та вибіркових рубок (рис. 5.73). Високий ефект міг би бути досягнутим в лісовому господарстві при здійсненні моніторингу за станом лісів, їх пошкодженням шкідниками, для контролю лісогосподарських заходів на лісопокритих площах, контролю за плановими нормативами використання лісових ресурсів.

Ступінь розпізнавання для різних типів рослинності різний. Найбільш чітко можуть бути відмежовані *контури лісової рослинності*.

Лісова рослинність виділяється на космічних знімках темнішим тоном зображення, ніж тон навколишніх об'єктів, і зернистою або плямистою структурою. Покриті лісом значні площі розпізнаються з великим ступенем надійності. Невеликі за площею ділянки лісів (колки) розпізнаються гірше, оскільки їхнє зображення у вигляді дрібних темних плям схоже із зображен-

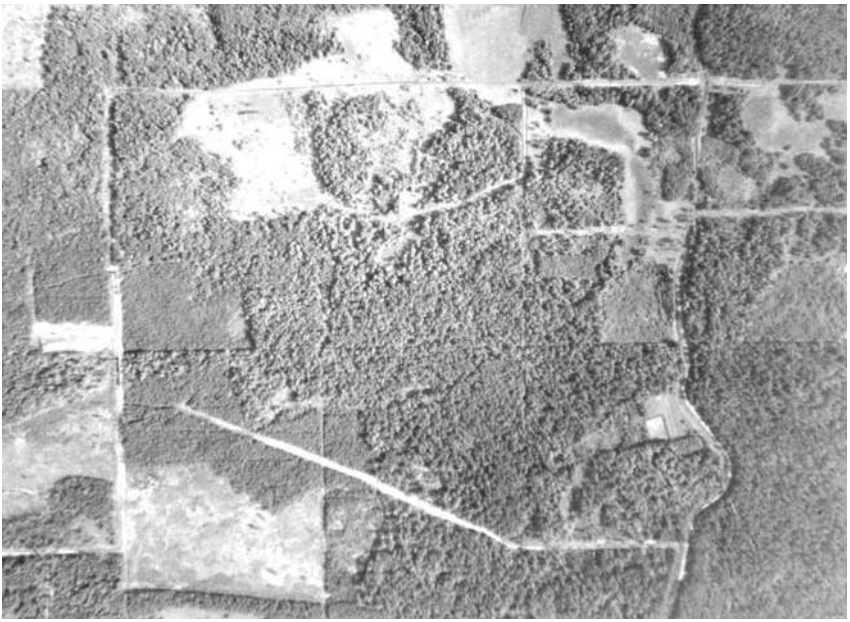


Рис. 5.73. Ліс з інтенсивним використанням на рівнині (Мале Полісся). Багато доріг, просік, старих і нових лісосік. На старих лісосіках нема лісопосадок, спостерігається самовідновлення лісу на лісосіках та полянах.

ням плям іншого походження (термокарстові чи воднокарстові, степові блюдця).

Зерниста або плямиста структура фотозображення лісу на космічних знімках викликана частою зміною невеликих ділянок лісу з різним породним складом, віком, повнотою насаджень, відмінностями в підліску і травостою і т. п. Так, наприклад, ліси високої зімкнутості у зволожених знижених місцях зображаються темнішим тоном. Зображення молодняків, іноді світліше, ніж зображення стиглих лісів тієї ж породи.

Породний склад лісів можна визначити на космічних знімках далеко не повсюдно, а лише в тих випадках, коли зміна породного складу співпадає із зміною типу лісу і умов місцезростання.

Найкраще розрізняються на аеро- і космічних знімках типи лісу, оскільки зміна лісорослинних умов виявляється в цілому комплексі природних компонентів, що включає рельєф, умови

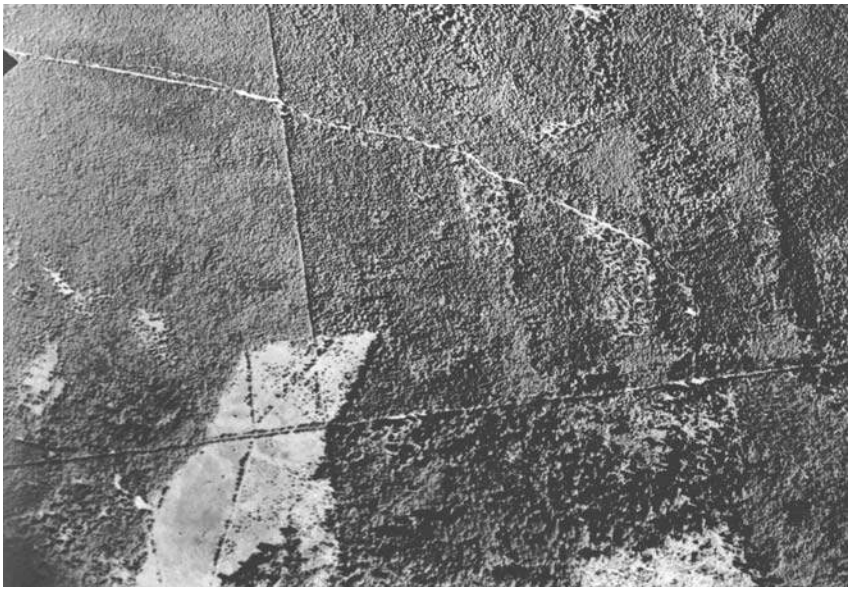


Рис. 5.74. Зображення залісненої рівнинної території. Видно однопородний листяний молодий ліс (зліва), старий саджений ліс (темні грубозернисті смуги в центрі і справа) та незайняту лісопосадками заболочену з ровами ділянку (світло-сіра з лінійними границями (в нижній частині зліва).

ґрунтового зволоження, ґрунти, трав'янистий і деревний покрив, його породний склад, висоту і густину дерев тощо. Весь цей комплекс добре відбивається на космічних знімках (рис. 5.74.).

Рідколісся розпізнаються як освітлені плями серед масивів лісів.

Вирубки також мають вид освітлених плям своєрідної конфігурації з різкими лінійними та ламаними межами, не пов'язаними (на рівнинах) з природними контурами. В горах ці контури тісно пов'язані з рельєфом. Звичайним є їхнє сусідство з дорогами для вивозу лісу (рис. 5.75).

Часто світлі плями в масивах лісів відповідають ділянкам розріджених молодих лісів на місцях давніх згарищ. Для них характерні пальчасто розгалужені смуги, витягнуті у напрямі пануючих вітрів, виразна межа початку плями давнього згарища і плавна, або клиноподібна та нечітка кінцева межа.

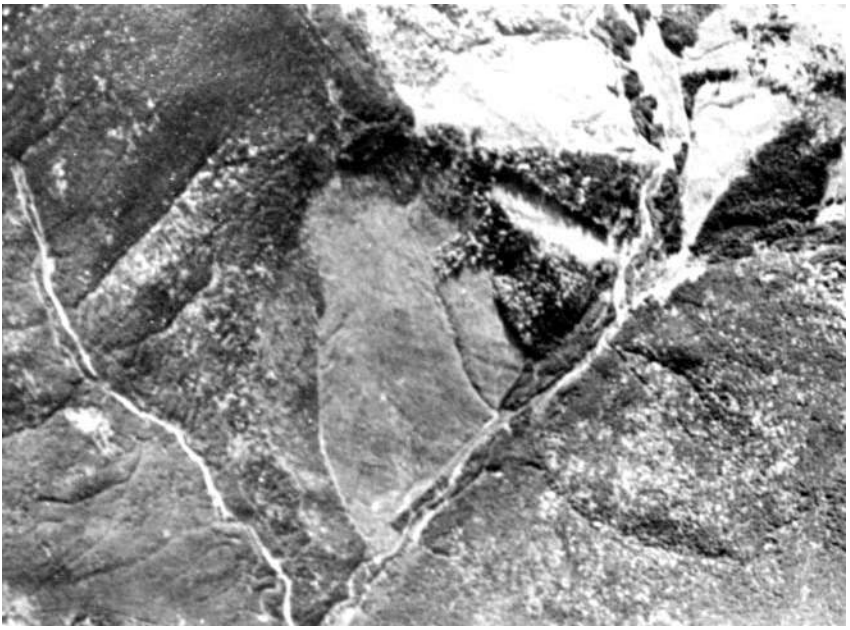


Рис. 5.75. Низькогірні схили Карпат, вкриті мішаними лісами (майже чорні – смеречники, темно-сірі фототони з білими вкраплинами (мішані ліси)). Свіжі вирубки – світло-сірі ділянки, старші вирубки – сірі плями. В долинах рік – дороги.

Вивчення Землі з космосу дає можливість виявлення лісових пожеж в реальному часі. Це важливе народногосподарське завдання. Розвиток сучасної інфрачервоної техніки дозволяє виявляти пожежі на початковій стадії їхнього розвитку. Такі системи стеження вже створені і використовуються багатьма державами.

Основними ознаками, за якими пізнають на космічних знімках полезахисні лісові смуги, служать їхній темніший тон, ніж тон прилеглих сільськогосподарських угідь, і яскраво виражена вузька прямолінійна форма.

Добра оглядовість космічних знімків дозволяє встановити просторові закономірності розміщення лісової рослинності в межах великих регіонів і проводити оперативне планування лісогосподарських заходів (рис. 5.76).

Одночасний огляд великої території на космічних знімках дає змогу виявити основні закономірності в розповсюдженні рослин-

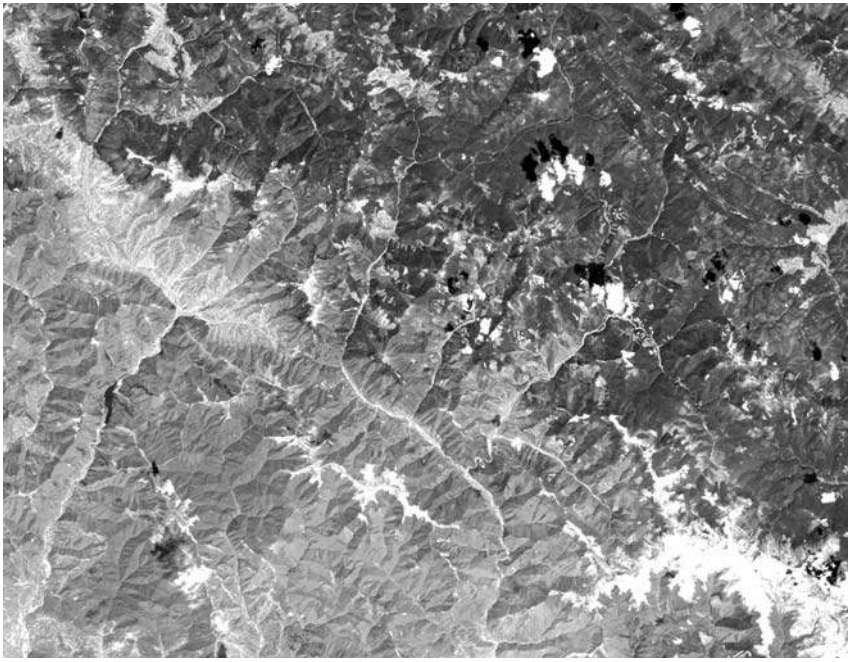


Рис. 5.76. Ліси південно-західного макросхилу Українських Карпат переважно букові (сірі фототони на космознімку), а північно-східного – смерекові (темно-сірі тони). Світло-сірими відтінками зображаються сільськогосподарські угіддя на узгір'ях і в долинах рік, білуватими тонами – високогірні полонини, розташовані вище лісового поясу. Білі округлі плями з темними тінями біля них – хмари.

ного покриву, намітити межі між різними формаціями (гірськими і рівнинними), виділити зональні типи та інтразональну рослинність на рівнинах і висотні пояси в гірських областях.

Головною дешифрувальною ознакою для виділення степової зони є виявлення особливостей сільськогосподарського використання території. Для степової зони характерний високий рівень розорювання. Природна степова рослинність збереглася тут лише фрагментами на незручних для оранки ділянках або на заповідних територіях, а тому може бути виділена лише методом виключення розораних територій.

У пустельній і напівпустельній зонах спостерігають порівняно хороше збереження природної рослинності і цілком задовільну

її придатність до дешифрування. Рослинний покрив цих регіонів представлений в основному різними ценозами з невеликим проективним покриттям ґрунту. Для них характерний порівняно однорідний сірий фототон із слабовираженою плямистою структурою Для галофітних комплексів на засолених ґрунтах характерні найбільш світлі тони.

У гірських районах за космічними знімками добре піддаються дешифруванню навіть поєднання рослинних асоціацій. В межах поєднань може спостерігатися більш-менш закономірне чергування ділянок, зайнятих криволіссям, чагарниками або луками. Ці поєднання дешифрують за чергуванням темних і світлих плям та смуг. При дешифруванні рослинності на космічних знімках слід брати до уваги час виконання знімання з тим, щоб врахувати сезонні аспекти рослинного покриву та зміни фототону на схилах затіненої експозиції. Так, наприклад, лучна або болотяна рослинність, сфотографована в середині літа зображається темним сірим тоном. Висихання рослинності в кінці літа і восени приводить до освітлення тону на знімках, зроблених в цей час.

Космічні знімки за різні періоди часу дають змогу виявити динаміку рослинного покриву і ступінь антропогенної дії на нього.

### *5.5.2. Особливості відображення рослинності на аерофотознімках*

Дешифрування рослинності є однією з найстаріших областей застосування аерофотознімання для вивчення природних ресурсів. Проте, воно продовжує залишатися найскладнішим видом дешифрування.

Для вивчення рослинності із застосуванням аеро- та космофотознімання використовуються, мікрофотометричні, фотограмметричні методи, спектрофотометрія, а також аерофотографічне еталонування разом з методом екстраполяції і врахуванням закономірностей ландшафтних зв'язків.

Оскільки фототон зображення рослинності визначається її спектральною відбивною здатністю і фактурою рослинного покриву (світлотіньовою мозаїкою), для з'ясування закономірностей формування фотозображення проводяться натурні вимірювання спектральної яскравості рослинності і вимірювання оптичної щільності зображення цієї рослинності на знімках.

Природні умови аерофотознімання рослинності мають величезне значення під час її дешифрування. Так, наприклад, багаторічні зміни умов пов'язані з коливаннями фенологічних ритмів в різні роки і відповідними змінами структури та яскравості рослинного покриву [20]. У різних типах ландшафтів рекомендуються певні оптимальні терміни для аерофотознімання рослинності.

*Мікрофотометричний аналіз* заснований на вимірюванні щільності елементів (частин) фотозображення і вивченні закономірностей його просторового розподілу. Це дає змогу виділити фітоценози, що зобразилися на знімках, і зробити це вдається надійніше, ніж при візуальному наземному вивченні.

*Фотограмметричне опрацювання* знімків дозволяє отримати ряд кількісних характеристик рослинності – розміри контурів, а на аерофотоматеріалах – кількість і середню висоту дерев, діаметр крон, приблизний діаметр стовбурів, вік дерев та інші параметри.

*Еталонування* фотозображень рослинності підвищує надійність її дешифрування. Аерофотографічними еталонами можуть служити типові зображення окремої рослинної асоціації або поєднання асоціацій на знімках за певних технічних і природних умов фотографування. Еталони використовують при дешифруванні для зіставлення з зображенням для пошуку ідентичних рослинних асоціацій. Еталонними аерознімками служать типові віддешифровані аерознімки з виділеними на них геоботанічними контурами та анотаціями до них. Під час застосування методу дешифрування за еталонами найкращі результати отримують тоді, коли каталог еталонів створений для того природного регіону, в якому проводиться дешифрування.

*Ландшафтний метод дешифрування рослинності* заснований на взаємозв'язку рослинності і природних умов (рельєфу, умов освітлення і обігріву та зволоження, властивостей ґрунту, їх материнської породи тощо), розпізнаванні на аерознімках ландшафтних територіальних комплексів (фацій, урочищ, місцевостей, ландшафтів), а також на врахування їх спеціальної інтерпретації для виявлення складу і розподілу рослинності [19]. Це один з найпродуктивніших методів, яким найкраще володіють фізикогеографи, при спеціалізації яких акцент ставиться на системному устрої природи, при якій кожен компонент займає свою обумовлену та узгоджену з іншими компонентами нішу чи ареал.

Саме через це рослини часто стають індикаторами певних топологічних умов. Однак топологічні умови часто дешифрують легше, ніж рослинність. У зв'язку з цим оптимальним методом дешифрування рослинності є *ландшафтно-топологічний*, коли на підставі ландшафтних умов місця уточнюють територіальні та якісні ознаки рослинності.

Для дешифрування за аерознімками тундрової рослинності використовують сукупність ознак (рослинність, мікрорельєф, географічне положення). Відмінною рисою тундрової рослинності є її надзвичайна строкатість і мозаїчність, пов'язана зі зміною видового складу рослинних асоціацій. Це пояснюють різноманіттям екологічних умов на різних елементах мезо- і мікрорельєфу, які на даній території дуже сильно модифікують тепловий і водний режими місця.

Головна дешифрувальна ознака тундрової рослинності – структура малюнку і фототон зображення. Взаємозв'язані елементи ландшафту створюють характерну структуру фотозображення, властиву певним типам тундри: полігональній плямистій, купинно-мочаринній.

*Плямистий* тип тундри зазвичай розвивається на вододілах, перегинах схилів, на річкових терасах. У зв'язку зі суворими геокріологічними умовами рослинний покрив тут сильно розріджений.

На поверхні *полігональної* тундри склад і розміщення рослинності залежать від стадії розвитку полігонального рельєфу. На валиках полігонів зазвичай поселяється чагарничкова рослинність, в центральній частині – болотяні рослинні асоціації, які мають сірий фототон. Внаслідок деградації полігонів і зростання торф'яно-мохового шару в центральній його частині з'являються сухі мохи і лишайники, що створюють на аерознімках світлий фототон, який добре дешифрується.

У тундрових рівнинних районах на незаболочених просторах розвивається торф'яно-купинна тундра, що характеризується сірим тоном з дрібно-крапчастою структурою [78].

Мохова рослинність зазвичай зустрічається на заболочених поверхнях в знижених формах рельєфу. На знімках вона має однорідний сірий тон, який на зволожених ділянках стає темнішим.

Широко розвинені серед тундрової рослинності плоско-горбисті торфовища, що мають стійкі дешифрувальні ознаки. По-

верхня їх має полігональну будову, що виразно видно на знімках. На горбистих підвищеннях селяться лишайники, морошка, на схилах цих горбів виростають сланка полярна верба, багульник, а в заболочених міжгорбових пониженнях – осоко-мохова болотяна рослинність.

У гірських районах тундри на пологих схилах і плоских вододілах селяться чагарники, які на знімках мають вид темних смуг, орієнтованих уздовж схилу або при вершинах створюють віялоподібний перистий малюнок на світлому фоні. На плоских вершинах і пологих схилах височин часто майже суцільний покрив утворює ягель, що має на знімку світлий, майже білий фототон.

Дешифрування *лісової рослинності* дозволяє встановити склад деревних насаджень і отримати ряд їх кількісних характеристик. Дешифрування лісової рослинності ускладнюється великими сезонними змінами деревостанів, а також коливаннями спектральної відбивної здатності залежно від стану дерев.

Найважливішим питанням лісового дешифрування аерофотознімків є визначення породного складу насаджень. Здійснюється це за характерними ознаками габітусу дерев, переважно через проекцію їхніх крон та через характерний фототон. Наприклад:

- кедр сибірський (сосна кедрова) має неправильно округлі проекції крон із зубчатими контурами. Тон їхнього зображення від світло-сірого до сірого;
- сосна звичайна характеризується округлими формами проекцій крон сірого тону, Під час стереоскопічного розгляду крони сосни створюють враження завислих в повітрі пухнастих грудочок;
- ялина звичайна (смерека) має правильно округлу форму проекції крони темно-сірого тону. Ялинники створюють на знімку ділянки зі щільною дрібно-зернистою структурою. На краях масивів ялини спостерігаються витягнуті загострені тіні;
- ялиця сибірська (піхта) виділяється правильною округлою формою крон з рівними контурами. Тон зображення ялиці світлий;
- береза бородавчаста і пухнаста мають специфічну неправильно округлу форму проекцій крон, що складаються з дрібних зерен. Фототон берези світло-сірий. На краях бе-

резових масивів можна спостерігати купольні та загострені тіні розлогої форми;

- дуб за тоном зображення близький до берези. Крони його у верхній частині слабо закруглені, майже плоскі і розділяються на декілька частин, тому в проекції вони мають неправильну зубчасту форму. Характерною межею дубових деревостанів є наявність специфічних розривів між кронами;
- бук зображається світло-сірим тоном. Ділянка лісу з насадженням буку рівна, зімкнута, з малими проміжками поміж кронами.

Осінні знімки листяних лісів за своїми дешифрувальними ознаками вигідно відрізняються від літніх: вони отримують переважно світлі (жовті, оранжеві та бурі кольори). Це пов'язано із змінами спектральної відбивної здатності крон.

Дешифрування *степової рослинності* ускладнюється різноманіттям рослинних угрупувань, мінливістю дешифрувальних ознак в часі і просторі, антропогенною чи зоогенною порушеністю рослинного покриву. Серед степової рослинності можуть бути виділені деякі групи рослинних асоціацій: ковилові, , злакові, дерновинно-злакові, степового різнотрав'я, полинові.

Полинові асоціації спричиняють на знімках рівний світло-сірий тон . Вони дуже стійкі проти витоптування на пасовищах і дають велику різноманітність поєднань, утворюючи полинові, полиново-кострицеві та інші асоціації. Кострицеві асоціації, як правило, не мають великого розповсюдження і приурочені в основному до брівок балок. Кострица також зустрічається у поєднанні з іншими видами і утворює кострицево-біло-полинові, кострицево-житнякові, кострицево-пирійні асоціації. Вони відрізняються сірим тоном і мають форму витягнутих уподовж балок вузьких смуг.

Пирійні та мітлицеві асоціації відрізняються темно-сірим тоном і приурочені до улоговинних знижень з добре гумусованими і зволоженими ґрунтами.

В пустельних і напівпустельних районах на тон зображення рослинності робить вплив її густина і стан в різні сезони року, а також характер ґрунтів, особливо його засоленість.

Ділянки, позбавлені рослинності (солончаки, сори) спричиняють на аерознімках білий або дуже світло-сірий фототон. Фрагменти сухостепової рослинності зображаються світло-сірими тонами за

рахунок зеленувато-білястого забарвлення полину. Пустинна асоціація, представлена напівчагарниками, впродовж всього вегетаційного періоду має темні (густо-зелені і коричневі) кольори, що дають на знімках сірі і темно-сірі тони. Серед пустинної рослинності дешифруються чагарникові, напівчагарникові та трав'янисті асоціації.

Принцип дешифрування болотної рослинності завжди був і залишається ландшафтним, тобто на аерознімках виділяють мікро- і мезоландшафтні контури болотних масивів. Основні дані для дешифрування боліт дає аналіз малюнка болотних масивів і географічних умов їх розповсюдження: переважно, це замкнуті зниження, місця виклинювання ґрунтових вод, заплави рік, долини рівнинних рік з малим падінням, дельти рік, торфовища низинні, перехідні та верхові. Серед болотної рослинності виділяють елементарні рослинні угрупування і їх комплекси.

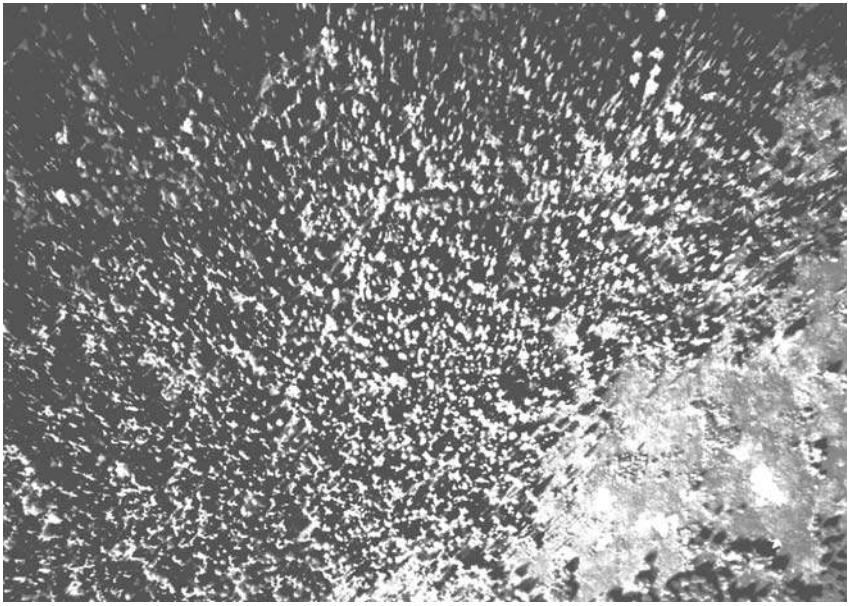


Рис. 5.77. Аерофотознімок розрідженого узлісся. Видно відблиски від крон дерев досонячної сторони в розрідженому лісі (центральна частина знімку), суцільний темний масив густого лісу (північно-західна частина знімку) та безлісі з чагарниками луки (південно – східна частина знімка). На цій же частині видно тіні від дерев та кущів, що вказують на їх форму.

Особливості зображення на аерознімках болотних фацій залежать від декількох причин. Головними з них є ступінь зволоження поверхні, стан верхніх ярусів рослинності, видовий склад рослинценозоутворювачів, фенофаза розвитку. Для вологих ділянок з трав'яним покривом характерна гамма темно-сірих тонів. Ділянки менш вологі з вищим проектним покриттям поверхні зображаються на аерознімках в гаммі світло-сірих тонів [31].

Фототон болотяних ділянок ніколи не буває однорідним і відрізняється своєрідною структурою, що складається із закономірного або безладного чергування мікроділянок рослинності. Цей малюнок часто ускладнюється зображеннями крон дерев і чагарників та тінями від них (рис. 5.77).

Під час дешифрування лучної рослинності провідне значення мають комплексні методи. При цьому найбільшого значення набуває виявлення місцеположення лучних асоціацій рослинності за їхнім зв'язком із рельєфом та елементами гідрографічної ме-

Рис. 5.78. Заплава р. Дністер зі старицею (північно-східна частина знімка) та давнє сухе русло (центральна частина), зайняті лучним різнотрав'ям.

режі. Лучна рослинність найчастіше приурочена до понижень в рельєфі (западин балок, заплав рік) з підвищеним зволоженням. Заплавні лучні асоціації добре виділяються на усіх типах знімків. Для лучної рослинності характерна гама сірих і темно-сірих однорідних фототонів (рис. 5.78).

Кольорове спектрозональне аерофотографування відкрило великі можливості в області геоботанічного дешифрування.

На спектрозональних аерознімках виразно відрізняються кольором хвойні і листяні породи. Ялина, ялиця, сосна зображаються синьо-зеленим або темно-зеленим кольором. Колір зображення листяних порід коливається від оранжево-червоного до буро-коричневого. Бук і граб зображаються оранжево-коричневими або світло-коричневими тонами, дуб – зеленувато-бурим або коричнево-бурим, береза і осика – світло-оранжевим або жовто-оранжевим кольором. Названі кольори для порід дерев можуть справджуватися тільки для певних видів спектрозонального знімання. На знімках, скомпонованих з матеріалів багатозонального знімання, синтез кольорів підбирається оператором і конкретні породи дерев на знімках різного синтезу можуть мати цілком різні кольори, наприклад, ліси соснові – червоні, смерекові темнофіолетові, а букові – голубі.

Болота зазвичай зображаються світлим жовто-зеленим кольором, а сильно зволожені місця на них синьо-зеленим або синім. Луки на спектрозональних знімках мають жовто-оранжевий або жовто-бурий колір. Для степової рослинності характерні смарагдово-зелені тони, ділянки засолених ґрунтів зображаються голубувато-зеленим тоном.

Під час дешифрування спектрозональних знімків слід враховувати сезонний колірний аспект рослинності, що робить істотний вплив на зміну кольорів у зв'язку із змінами її спектральної відбивної здатності.

## 5.6. Інтерпретація зображень ґрунтів

Дистанційне зондування ґрунтів та їхнє зображення на знімках давно використовують під час картографування ґрунтового

покриву – ще в "докосмічну еру", бо знімки земної поверхні з літаків показали багатство можливостей інтерпретації ґрунтів та виявили ефективність застосування аерофотознімків у пришвидшенні та суттєвому уточненні результатів наземного картографування. З появою космічних методів зондування з'явилися також і комп'ютерні технології опрацювання вихідних даних, а тому на передній план виступила потреба розробки методів космічного знімання для вивчення ґрунтового покриву із застосуванням автоматизованого комп'ютерного дешифрування ґрунтів. Разом з першими спробами таких робіт виявилася складність у вирішенні завдання через те, що цей метод значно відрізнявся від наземних і потребував розвитку нових галузей ґрунтознавства: оптика ґрунтів, радіофізика ґрунтів, фотохімія та енергетика ґрунтів, радіофізика ґрунтів. Надважливим виявилося вивчення залежності товщини радіаційно активного шару від довжини самих хвиль, електропровідності та діелектричної проникності різних ґрунтових відмін у всіх можливих їхніх станах. Потрібним було також надійне забезпечення ґрунтовними дослідженнями цих нових для ґрунтознавства характеристик. При цьому стояло завдання відрізняти не тільки ґрунтові відміни, виділяти ареали їхнього суцільного чи плямистого поширення, зуміти також супроводити інтерпретацію якісних характеристик кількісними показниками гумусованості, мінерального та мікроагрегатного складу, багатства на розчинні поживні речовини, визначити запаси вологи в ґрунтах. Сьогодні можна констатувати, що методика дешифрування зазначених показників для тестових полігонів існує, але постійно розвивається в бік ускладнення, бо кожен новий регіон дослідження, часовий стан ґрунтового та рослинного покривів потребує серйозного пристосування до місцевих умов. Це ж саме стосується впровадження нових методів і дистанційної знімальної апаратури, переходу від фотографічного до телевізійного кадрового та сканерного інтеґрального, монозонального чи багатозонального знімання, радіометричного профілювання.

### 5.6.1. Взаємодія ЕМХ з ґрунтами

*Відбивна здатність більшості сухих ґрунтів* характеризується такими закономірностями:

- Під час збільшення вологості ґрунтів зменшується їхня відбивна здатність (рис. 5.79). Це ж стосується всіх довжин

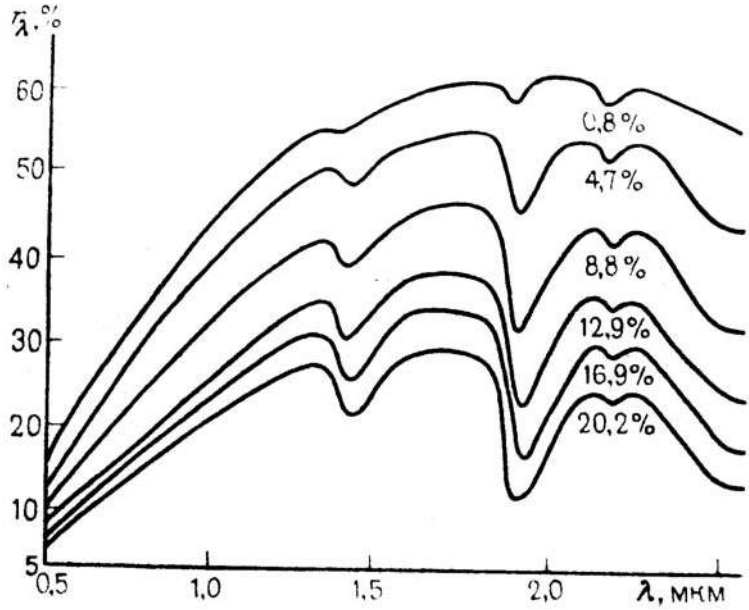



Рис. 5.79. Залежність відбивної здатності ґрунту від її вологості [43].

сонячного світла, його теплового випромінювання. При цьому яскравість ґрунтів може змінюватися в десятки разів під час зміни вологості в межах кількох відсотків. У коротких світлових хвилях (0,4–0,5 мкм) збільшення яскравості вкладається в межі кратності до 10, а найбільше ця особливість стосується інфрачервоних хвиль.

- яскравість ґрунтів наростає зі збільшенням довжини хвиль опромінення від 0,4 до 1,6–2,0 мкм;
- в більш довгих хвилях (2–3 мкм) яскравість ґрунтів поступово зменшується, але залишається найбільшою порівняно з іншими природними поверхнями (сніговими, льодовими, водними чи рослинними).

Криві спектральної яскравості вологих ґрунтів мають виразні прогини (зменшення яскравості) в зонах поглинання сонячної радіації водою з максимальним проявом цього явища в довжинах хвиль 1,45 та 1,95 мкм (рис. 5.79).

Важливою особливістю зміни відбивної здатності ґрунту є зміна структури поверхні ґрунту. Оскільки вона змінюється залежно від

погодної ситуації, агротехнічних заходів, то й яскравість одного й того ж ґрунту змінюється під час різних зовнішніх впливів, а саме:

- у разі збільшення брилуватості поверхні збільшується також сумарна поверхня, затінена брилами, зростає анізотропність відбиття. Створюються структурні частини, які сприяють багатократному відбиттю променистої енергії чи її поглинанню;
- зменшення розміру структурних частинок поверхні приводить до швидкого (експоненційного) збільшення яскравості. Найбільше зростання яскравості відбувається при діаметрі ґрунтових часточок 0,4 мм.

*Кольорометрія.* Колір є одним з найважливіших ознак ґрунту, що якісно його характеризує. На кольорах, по суті, побудована типізація ґрунтів (червоноземи, жовтоземи, буроземи, чорноземи та сіроземи). За кольорами дають означення генетичним горизонтам ґрунтів. Характеристика ґрунту за кольором не вичерпує себе цим означенням, бо *природа кольору ґрунту стосується довжини електромагнітних хвиль (ЕМХ), які створюють потік від ґрунту і зумовлені фізичними, фізико-хімічними, мінералогічними, біотичними та іншими властивостями ґрунту.* Крім того, кожен "кольоровий" потік ЕМХ є композитним, тобто складається з різних довжин хвиль, що властиві різним кольорам, а тому важливим з діагностичних поглядів є вміння розділити ці потоки, визначити їхню частку в композиті і знати, які причини зумовлюють появу та інтенсивність ЕМХ того чи іншого кольору (довжини ЕМХ). Це завдання є багатоплановим і складним, проте перспективним у діагностиці ґрунтів та в інших галузях природознавства.

Є два основні методи оцінки кольорів: а) суб'єктивне візуальне означення кольорів, коли назва і відтінок кольору залежить від специфіки зору конкретної людини, її спеціальної підготовки, тренованості зору, психофізичного стану. За такого оцінювання кольорів застосовують спеціальні атласи, де кольорам і їхнім відтінкам присвоюються відповідні означення та номери, або ж використовують кольорові діаграми чи шкали, які допомагають правильно означити те зорове враження, яке отримав конкретний суб'єкт чи спеціаліст-ґрунтознавець під час дослідження ґрунту. На таку оцінку впливають не тільки поліграфічна чи хімічна якість шкал, фізичні (оптичні) можливості ока та аналітичні здатності

зорових аналізаторів (зорових центрів мозку), а й умови визначення (умови освітлення, кут падіння та відбиття світла, світлові тіні і контрасти, час дня, шорохуватість поверхні, структура, вологість та інші механічні й фізико-хімічні властивості ґрунту).

У разі переходу до методів об'єктивної оцінки кольору ґрунту повинен бути ліквідований вплив суб'єкта і потрібно враховувати тільки фізичні властивості самого об'єкта, які впливають на формування його кольору.

Об'єктивну оцінку кольорів дають прилади, за допомогою яких кількісно вимірюють інтенсивність світлових потоків, та їхню кольористику. Це фотометри, спектрофотометри, колориметри. Першопочатково (вже в сорокових роках минулого століття вони були розроблені для лабораторних, а пізніше і для польових умов використання) для вимірювання інтегрального світлового потоку служать фотометри, а для розділення потоку за довжинами хвиль – спектрофотометри.

Ці прилади ще не відзначалися високою точністю, потребували значних затрат часу на вимірювання, однак зумовили значний прогрес в точності визначення кольорів та у розв'язанні їхніх діагностичних зв'язків, розрізнянні за кольорами різновидів ґрунтів одного генетичного ряду, визначенні деяких їхніх властивостей.

Застосування спектрофотометрів вже на початкових етапах дали змогу визначити, що у світловому діапазоні ЕМХ для всіх ґрунтових зразків відбиття світла зростає зі збільшенням довжини хвилі, а найбільші різниці між зразками появляються в інфрачервоній зоні ЕМХ. Це означало, що саме ця зона, яка недоступна для сприйняття очима людей, може стати найбільш перспективною в діагностиці властивостей ґрунтів. Виконані дослідниками серії спектральних вимірювань ЕМХ ґрунтів та інших діяльних поверхонь (Крінов) дали змогу створити атласи спектральних образів цих об'єктів, що стали вихідним, фундаментальним матеріалом для дистанційної діагностики діяльних поверхонь під час аналізу матеріалів багатозонального знімання.

З намаганням перенести такі методи у "сферу" дистанційного зондування наземні методи і прилади потрібно було по-новому розробити для умов кольорометрії з космосу, до того ж з наданням їм можливості видавати просторово правильне зображення кольорів діяльної поверхні.

З'ясувавши, що результати спектрофотометрії тісно пов'язані з речовинним складом ґрунтів, з'явилася потреба уникнути або зуміти визначати вплив таких мінливих характеристик, як вологість, дисперсність та загальний структурний стан приповерхневих шарів ґрунтів.

*Закономірності відбиття світла ґрунтами.* Під час потрапляння світла на будь-яку поверхню світловий потік зазнає змін, які залежать від властивостей цієї поверхні. Процес трансформації супроводжується різними оптичними явищами (поляризація, дисперсія, абсорбція світла). Сама речовина, на яку потрапило світло, також реагує на це і змінюється відповідно до якості та кількості світла (відбуваються зміни енергетичних запасів, структури, проходять фотохімічні реакції розкладу і синтезу). Результат такої взаємодії корегується також оптичними властивостями освітлюваної речовини, тобто здатністю відбивати, поглинати чи пропускати ЕМХ (рис. 5.80), а також здатностями самих хвиль

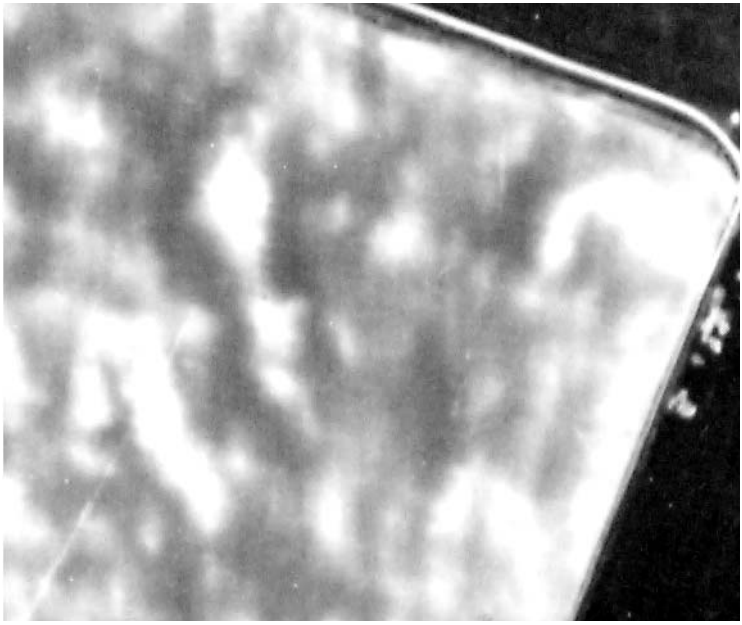


Рис. 5.80. На зораному полі з дерново-карбонатними ґрунтами на звітрених мергелях добре видно "розмиті" дуже світлі плями цих мергелів, винесених на денну поверхню глибокою оранкою.

поглинатись, відбиватись, проникати на певну глибину чи проходити через досліджуване середовище (ґрунт).

Всі ці явища відбуваються одночасно, але в різних пропорціях для різних середовищ. Зокрема, оптично непрозорі середовища майже не пропускають світлових хвиль, а весь їхній потік відбивається або перетворюється в тепло. Такими є майже всі мінеральні та органічні ґрунти. Однак поверхня ґрунту може бути покрита плівкою або шаром різної товщини води, льоду чи снігу, які мають цілком інші оптичні та електричні властивості: для них характерне добре виражене відбиття, проникнення, заломлення світла і слабше (залежно від товщини і структури шару) поглинання. Отже, ґрунт можна розглядати як оптично щільне та анізотропне[11] середовище зі змінними властивостями в просторі і часі. Варто зазначити, що ґрунт є багатофазним[12] та полідисперсним[13] середовищем.

Тверда фаза ґрунту має неоднорідний хімічний та мінералогічний склад, містить значну кількість хромофорів[14] з високою вбирною і відбивною (стосовно світла) здатністю. Рідка фаза ґрунту – це (найчастіше) багатокомпонентний за структурою ґрунтовий розчин, що також містить світлові сорбенти[15].

Газова фаза ґрунту – це ґрунтове повітря, що заповнює пори ґрунту, які стосовно світлового потоку можуть служити своєрідними світловодами, що починаються на поверхні і закінчуються, здебільшого, на невеликій глибині.

Під час розгляду закономірностей характеру відбиття падаючого на ґрунт денного світла в його інтегральному стані користуються і*ндикатрисами відбиття*[16]. У ґрунтів вони різні, але є такі закономірності:

- більшість рівних ґрунтових поверхонь у сухому стані мають індикатрису, характерну для матових поверхонь, тобто від-

---

[11] Анізотропне середовище – з неоднаковими фізичними властивостями в усіх напрямах.

[12] Багатофазне – складається з речовин, що перебувають у різних фазах – твердій, рідкій, газовій та ін.

[13] Полідисперсне середовище – для якого характерний різний ступінь роздробленості.

[14] Хромофори – атоми в речовинах, що надають сполукам (мінералам, іншим речовинам) різного кольору.

[15] Світлові сорбенти – вбирачі, поглиначі світла.

[16] Про індикатриси відбиття – в розділі "Природні умови та фізичні основи ДЗЗ".

бивають світло дифузно, майже рівномірно в усі оптично прозорі напрямки. Інтенсивність відбиття прямо пропорційна інтенсивності освітлення і модифікується альбедо поверхні. Альбедо поверхні одного і того ж ґрунту збільшується під час здрібнення його гранул (наприклад, під час розтовкання колесами транспорту на польових дорогах. Ступінь зростання відбивної здатності при роздрібненні агрегатів зростає по експоненті. Подібно збільшується відбивна здатність ґрунту під час руйнування структурних агрегатів дощем і формуванні безструктурної кірки після її висихання. Відбивна здатність ґрунту суттєво зменшується у разі зростання вологості ґрунту та в пониженнях полів, де довше зберігається волога (рис. 5.81).

- Індикатриси поверхонь сирих і мокрих ґрунтів характеризуються дифузним та спрямованим типом. Такі поверхні можуть блистіти, тобто наближатись до дзеркальних поверхонь, або мати контрастне відбиття, якщо елементи поверхні сирих ґрунтів набули з певних причин різної орієн-

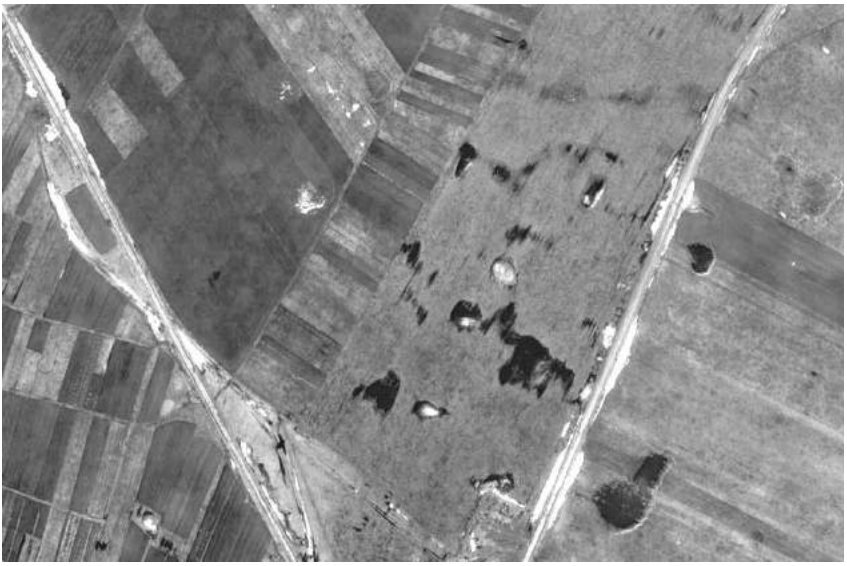


Рис. 5.81. У пониженнях на плоских полях затримується волога, і ці пониження виглядають темнішими, навіть чорними.

тації (скиби зораного поля). У цих випадках інтенсивність відбиття також пропорційна освітленню, але значно залежить від співвідношення кута падіння і напряму орієнтації та кута візування.

- Перенасичені водою поверхні ґрунтів за характером відбиття наближаються до дзеркальних, особливо під час освітлення прямими сонячними променями.

Отже, у разі дешифрування ґрунтового покриву та визначення його якісних і кількісних властивостей обов'язковим є врахування висоти сонця, співвідношення прямої та розсіяної радіації в падаючому світловому потоці, загальної орієнтації поверхонь та орієнтації її складових частин, вологості ґрунту і його насиченості водою та поверхневими кристалами льоду.

*Таблиця 5.6.1.*

Середні значення і межі варіювання величин інтеґрального відбиття (у %) гумусовими горизонтами ґрунтів [81].

| Назва ґрунту | Середнє значення | Ймовірні межі інтеґральної яскравості |
|---|---|---|
| Тундрові | 9,3 | 6,9–11,7 |
| Торфи | 7,9 | 4,7–11,1 |
| Дернові лучні та лучно-болотні | 13,1 | 9,5–16,7 |
| Дерново-підзолисті | 16,9 | 10,5–23,3 |
| Ясно-сірі лісові | 21,1 | 17,2 25,0 |
| Сірі лісові | 18,1 | 13,923,0 |
| Темно-сірі лісові | 7,4 | 4.,1–10,7 |
| Чорноземи типові потужні | 8,2 | 6,4–10,0 |
| Чорноземи звичайні | 7,9 | 6,4–9,4 |
| Чорноземи Передкавказзя | 11,6 | 8.9–14,3 |
| Каштанові | 13,2 | 11,6–14,8 |
| Світло-каштанові | 21,8 | 19,3–24,3 |
| Сіроземи | 27,7 | 25,7–29,7 |
| Червоноземи | 18,6 | 17,4–19,8 |
| Жовтоземи | 16,6 | 13,4–19,8 |

Неоднорідність зафарбування ґрунту також значно впливає на інтегральну та спектральну відбивні здатності. Сприйняття її залежить від роздільної здатності матеріалів ДЗЗ і розмірів плям на діяльній поверхні. На вирахуванні матеріалах низької розділь-

ної здатності плями інтегруються в один фототон, а на матеріалах високої роздільної здатності можна вирахувати співвідношення плям з різним альбедо. Цю змогу доцільно використовувати під час дешифрування солонців, солончаків та вторинно засолених ґрунтів, на еродованих площах, на територіях з поширенням дерново-карбонатних ґрунтів, де на денну поверхню можуть виходити збагачені карбонатами глибокою оранкою та змивом ґрунтові суміші чи білі карбонатні породи з дуже високим альбедо (рис. 5.79, рис. 5.82.).

Спеціально проведені дослідження відбивних властивостей ґрунтів показали також, що чорноземи мають найменше альбедо (табл. 5.6.1) для інтегрального пучка світла і майже не вирізняються селективністю до хвиль різної довжини під час його відбивання. Відбиття світла іншими ґрунтами, в яких вміст гумусу менший, загалом є інтенсивнішим і сильно змінюється залежно від вмісту гумусу. Для цих ґрунтів характерним є також прояв селективності у поглинанні та відбиванні світла, специфіка якої залежить від мінерального складу діяльної поверхні. Зокрема, спектральна крива відбитого світла виявляє сильне зростання відбиття оранжевих та червоних хвиль, поверхнями середньозмитих дерново-підзолистих та підзолистих ґрунтів у разі виходу на денну поверхню

Рис. 5.82. Розчленована водно-ерозійними врізами височинна поверхня. Видно світлі плями змитих ґрунтів на схилах до ярів та балок. Схили верхніх частин ярів закріплені посадками чагарників. Видно також напрямки оранки на полях.

ілювіального горизонту, для якого характерним є високий вміст окисних форм заліза.

Варто зазначити, що впевнено діагностувати тип ґрунту лише за показниками інтегральної відбивної здатності вдається за умови виконання наземного тестування фототонів того природного регіону, для якого виконане знімання. В іншому природному регіоні потрібним буде своє тестування фотояскравості матеріалів зніманння, віднайдення зразкових фотонів для діагностування ґрунтових відмін. Наголосимо, що навіть без правильного діагностування ґрунту саме прочитання на знімках плямистості з різною інтегральною яскравістю дає змогу значно поліпшити якість та точність картографування ґрунтів в умовах їхнього польового картографування. Це доведено досвідом картографування ґрунтів ще в 50–60-ті роки XX ст., коли використовували чорно-білі матеріали аерофотознімання в інтеґральному оптичному діапазоні спектра ЕМХ. Вже тоді було зрозуміло, що для повнішої діагностики потрібні фотоматеріали, виконані в інших часових та фізичних умовах (в інших хвилях, кольорове знімання), з метою їхнього порівняння та інтерпретації. Досвід наступних років показав, що під час використання багатозонального знімання можливості дешифрування ґрунтового покриву суттєво розширилися.

Виявлено, що на знімках в зеленій зоні добре виражається контраст мінеральних ґрунтів, наприклад, дерново-підзолистих, а в ближній інфрачервоній зоні різко зростає оптична щільність зображення торф'яно-болотних ґрунтів.

На підставі масового спектрометрування ґрунтів України та Молдавії, виконаних разом з наземними дослідженнями та лабораторним спектрометруванням зразків ґрунту, вироблена класифікація спектрів відбиття типів і підтипів ґрунту, за якими складена ґрунтова карта.

Для дистанційного вивчення системи ґрунт–рослинність рекомендують вузькі спектральні зони з такими довжинами хвиль: 410, 550, 675, 795, 1 650 нм, а для визначення вмісту гумусу – 400, 600, 750 нм [92]. Матеріал досліджень із застосуванням спектральної відбивної здатності природних поверхонь узагальнений у формі каталогів та карт, однак, на думку Росса Ю., найбільш повним каталогом спектральної відбивної здатності поверхонь слугує монографія У.Л. Кринова, видана в 1947 р.

*Поглинання світла ґрунтом.* Ґрунт, як більшість природних утворень, поглинає пряме чи розсіяне сонячне випромінювання вибірково, а тому спектр та інтенсивність падаючого проміння буде відрізнятися від таких самих параметрів відбитого випромінювання. Для різних ґрунтових відмін такі трансформації відрізняються, а тому в специфіці відбитих сонячних променів закладена одна з можливостей діагностики властивостей ґрунтів.

Для всіх різновидів ґрунтів та сформованих ними поверхонь дослідженнями виявлено ту специфіку, що коротші хвилі оптичного діапазону (фіолетові, сині, голубі) вбираються сильніше і відбиваються слабше, а довші (жовті, оранжеві, червоні) відбиваються сильніше і поглинаються слабше. Саме тому ми бачимо кольори ґрунтів якраз у спектрі від жовтих до червоних кольорів. Крім того, знання специфіки формування "акорду" відбитих хвиль за різних умов освітлення та їхнього зв'язку з властивостями ґрунту може бути використано для ЕМХ діагностики ґрунтів.

Поглинання світлової енергії відбувається в дуже тонкому (товщиною всього 1–10 мм) приповерхневому шарі ґрунту. Інтенсивність поглинання обернено пропорційна відбиванню ЕМХ і залежить від альбедо поверхні ґрунту, яка добре корелює із вмістом у ґрунті гумусу, який, по суті, зумовлює його темне забарвлення (рис. 5.83). Отже, чим темніший ґрунт, тим більше тепла він поглинатиме за конкретних географічних умов, буде теплішим і більш сприятливим для розвитку мікробіологічних процесів, які супроводжують перехід від розкладу відмерлої органіки через стадії формування гумусу (фульвокислоти, гумінові кислоти) до синтезу гумінів, гумусу).

Отож, взаємодія світлової енергії з ґрунтом працює за схемою самозбудження і самопідсилення, що в підсумку сприяє покращенню родючості ґрунту, зміні грануляції та структурованості, а щодо альбедо і власного теплового та радіовипромінювання – зумовлює динаміку кількісних та якісних показників. Ця динаміка сприяє інтерпретації характеристик ґрунту з матеріалів ДЗЗ: ґрунти з більшим альбедо є менш гумусованими та менш теплими з меншими шансами фотохімічної активізації гумусоутворення, прогрівання, нагромадження тепла в поверхневому шарі та формування теплового потоку в ґрунті.

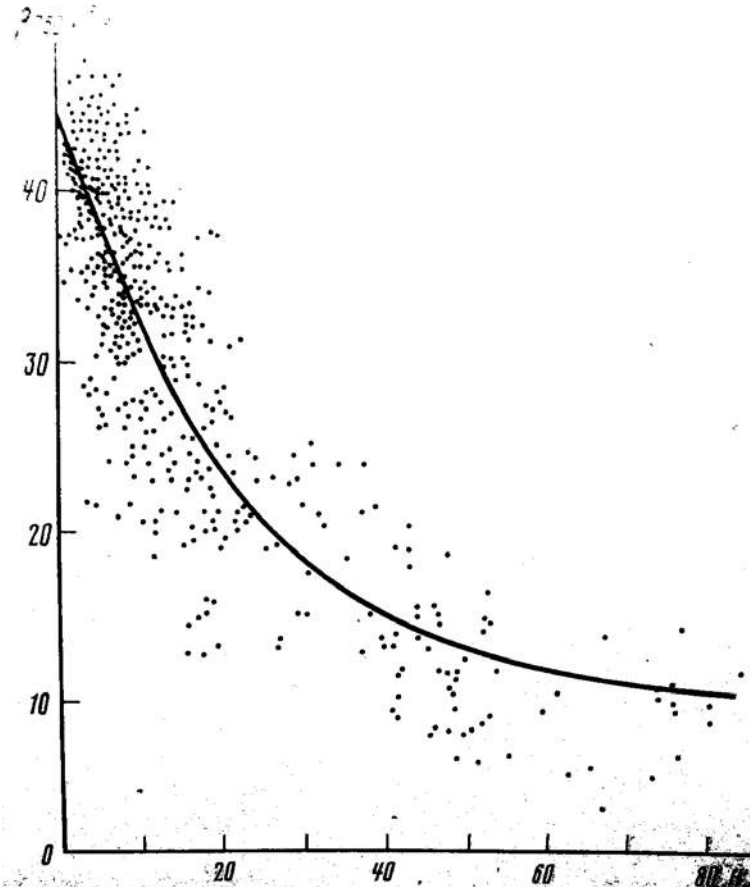



Рис. 5.83. Залежність спектрального коефіцієнта відбиття при довжині хвилі 750 нм від вмісту органічної речовини в ґрунті (Орлов, Суханова, 1983).

Поглинуте тепло передається різними способами вглиб (тепловий потік в ґрунт), а також нагріває приземні шари повітря (тепловий потік в атмосферу), затрачається на фізичне випаровування вологи з поверхні та верхніх шарів ґрунту. Поглинута енергія, перетворившись на тепло, змінює інтенсивність випромінювання в позаоптичних діапазонах ЕМХ – середніх і дальших інфрачервоних, надвисокочастотних сантиметрових та дециметрових.

### *5.6.2. Особливості дешифрування ґрунтів на знімках*

Для безпосереднього дешифрування ґрунтів застосовують знімки, виконані в період максимальної їхньої "відкритості", тобто в період весняний та осінній, коли сільськогосподарські поля розорані, або коли рослини мають мінімальну висоту та проективне покриття. В усі інші сезони ґрунтовий покрив закритий рослинністю чи снігом. Більшу частину року на сільськогосподарських полях рослинність є зовнішнім покривом земної поверхні, а тому передусім відображається на космічних знімках. Водночас саме природна і культурна рослинність є головним індикатором дешифрування ґрунтового покриву, материнських порід, форм рельєфу, ґрунтових вод тощо. Тому вивчення рослинності за космічними знімками і встановлення дешифрувальних ознак різних типів рослинного покриву має важливе значення.

На космічних знімках ґрунтовий покрив знаходить достатньо хороше віддзеркалення. На розораних територіях він проявляється через диференціацію в стані посівів. На ділянках з природною рослинністю ґрунтовий покрив виділяється завдяки зміні рослинних асоціацій, що розвиваються на різних типах ґрунтів. На космічних знімках достатньо виразне відображення мають зональні типи ґрунтів, пов'язані із зональними типами рослинності. Внутрішньозональні варіації ґрунтового покриву також знаходять своє відображення. Зокрема, наприклад, у сухих регіонах мережа балок з лучною рослинністю характеризується темним фототоном завдяки більшому зволоженню і наявності в них гідроморфної рослинності. У вологих та заліснених регіонах балки виглядають світлими. Добре відбиваються інтразональні вкраплення ґрунтів солонцево-солончакового ряду і болотних ґрунтів на перезволожених ділянках.

На космічних знімках також добре відбивається комплексність ґрунтового покриву, пов'язана з мікрорельєфом, зокрема, велика оглядовість космічних зображень дає змогу вивчати структуру мікрорельєфу на великих просторах і надійно визначати генезис ґрунтової комплексності (рис. 5.84).

Для ґрунтових комплексів характерне плямисте фотозображення з розпливчатими межами плям. Різний ступінь засоленості позначається посвітлінням фототонів.

Рис. 5.84. Колковий[17] лісостеп на півдні Західно-Сибірської низовини зі складним комплексом ґрунтів, що змінюються від міжколкових підвищень (1–2 м) до дна колка в такому порядку: медальйонні чорноземи, лучно-чорноземні, солонці глибокі, солонці середні, солонці мілкі та коркові, лучні осолоділі, солоді – лучно-болотні. Це зміна не тільки різновидів ґрунтів, а й їхніх типів. Проте характерною вона може бути на відстані 50–150 м, що варто враховувати як регіональну особливість під час дешифрування.

На космічних знімках добре розрізняються ґрунти різного механічного складу. За світлим тоном виділяють масиви піщаних ґрунтів і пісків. Хороше відображення отримує також еродованість ґрунтового покриву, видні світлі плями на ділянках розвитку пло-

[17] Колки – круглої форми вкраплини лісів у лісостепу, приурочені до суфозійних знижень. Лісоформуючі породи – береза та осика. В цетрі таких колок можуть бути болота та озерця.

щинного змиву, плями проявів вітрової ерозії ґрунтів на розораних територіях. Це важливо для розроблення протиерозійних і протидефляційних агротехнічних заходів [65].

Використання сканувальних систем інфрачервоного і мікрохвильового діапазонів дає змогу вивчати температуру і вологість ґрунтів. Теплове інфрачервоне сканування особливо чутливе до вологовмісту верхнього шару ґрунту. Пониження температури поверхні ґрунту пов'язане з підвищеним вологовмістом і зображується потемнінням фототону. Ділянки світлого тону характеризують сухіші і порівняно теплі ділянки.

Визначення вологості ґрунтів за наслідками мікрохвильового зондування проводилося зі супутника "Космос-243". Мікрохвильове випромінювання проникає в ґрунт на глибину біля 1 м, тому відкриваються можливості для вивчення вологості і температури підповерхневих шарів ґрунту. Ці дослідження особливо важливі в посушливих і напівпосушливих районах світу [7] .

Вивчення ґрунтового покриву за матеріалами космічних знімань значно полегшене застосуванням багатозонального фотографування, яке ґрунтується на фіксуванні відмінностей у спектральній яскравості різних ґрунтів. Зокрема, наприклад, на знімках, отриманих в червоній зоні спектра, зображення пісків і солончаків має однакову яскравість, і тому вони зображаються однаковим світлим фототоном. На знімках у блакитному спектральному діапазоні яскравість зображення пісків зменшується, а зображення солончаків залишається найбільш яскравим. Це дає змогу розділити їх і точно оконтурити різні типи ґрунтів [64].

Своєрідною непрямою ознакою для дешифрування ґрунтів може слугувати господарське, зокрема сільськогосподарське, використання земель. При цьому використовують приуроченість сільськогосподарських угідь до певних ґрунтових умов, наявність осушувальних чи зрошувальних систем, протиерозійне інженерне чи фітомеліоративне облаштування земель. Усі зазначені об'єкти легко дешифрують, а тому вони є надійною опосередкованою ознакою ґрунтів у разі належного врахування регіональної географічної інформації.

Подібно може бути використаною густина (проективне покриття) ґрунтів рослинністю сільськогосподарською чи природ-

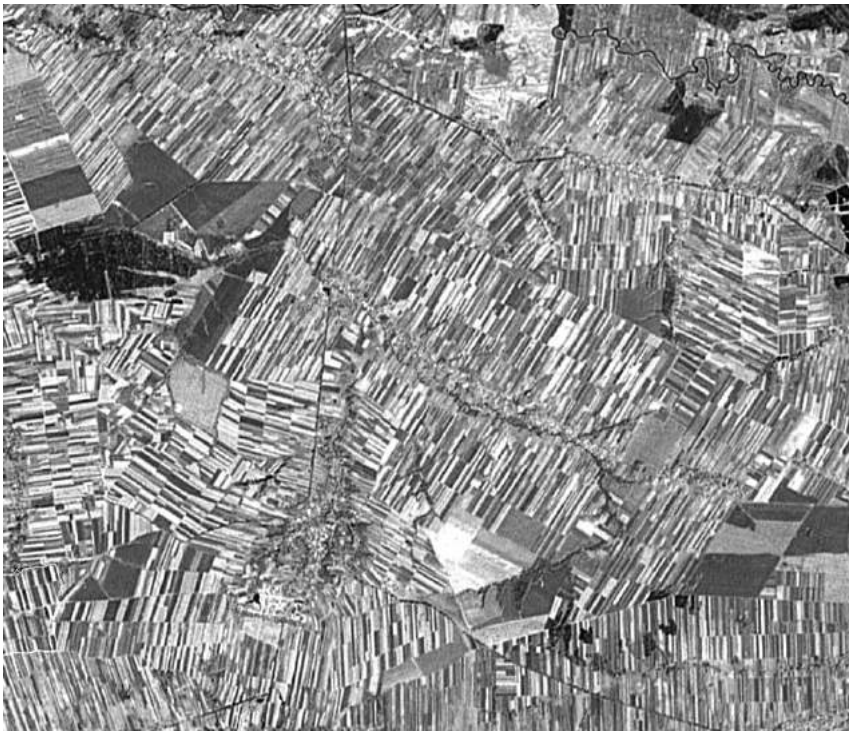


Рис. 5.85. Дрібнопольове землеробство на Сокальській височині в межах Польщі. Орієнтація полів вздовж схилів до річкових долин, що сприяє їхньому ерозійному збідненню. Села розташовані в долинах.

ною. Дещо складніше, але за наявності відповідних знань з біогеоценології, успішно можна використовувати для дешифрування ґрунтових відмін дешифрування самої рослинності. При цьому успішно використовують рослинні індикатори (соснові ліси на піщаних ґрунтах), або фітоценотичні індикатори (вологотравні та суходільні лучні ценози).

У дешифруванні ґрунтів можуть бути використані також форма і розміри полів, їхня просторова орієнтація, приуроченість до інших виразних об'єктів, наприклад, до ерозійної чи річкової сіток, а також сліди обробітку полів – напрямки оранки, культивації, прокладання дрен, чи збирання врожаю (рис. 5.85).

## 5.7. Особливості зображення ландшафтних комплексів

Зображення земної поверхні, яке подається на матеріалах аеро- та космічного знімання, формується завдяки потоку ЕМХ, що йде від поверхні Землі, і залежить від властивостей цієї поверхні. При цьому треба пам'ятати, що поверхня Землі, в тім числі її *радіаційно активний шар (РАШ)*, є лише частинкою планети Земля, яка є частинкою системно організованого Світу зі своїми законами розвитку та динамічним процесом обміну речовиною та енергією.

Поверхня, а відповідно її властивості, були створені внаслідок генезису території в умовах певного географічного розташування. Формуванню земної поверхні сприяли чинники світового, планетарного та локального порядків, які розглядають як космічні, тектонічні, геологічні, літологічні, кліматичні, гідрологічні, біологічні, педологічні, антропогенні, що діяли протягом значного відрізку часу. Накладання стількох чинників у своєрідних комбінаціях наявності та активності кожного з них у конкретному місці і в конкретний час призвело до формування різноманітних природних систем зі своїми індивідуальними властивостями (географічні системи, природні територіальні комплекси). Оскільки формування природних утворень є процесом безперервним і триває постійно, то властивості природних формацій несуть в собі інформацію про свій генезис та про стан на даний момент.

З огляду на те, що внесок у формування потоку ЕМХ у космос забезпечують усі компоненти природних територіальних комплексів, то й інформаційний потік ЕМХ є комплексним, однак від кожного територіального комплексу випромінюється "свій" комплексний "акорд" ЕМХ. Під час вирішення завдань галузевого дешифрування постає проблема виокремлення інформації, необхідної для прямого чи непрямого дешифрування об'єктів окремої галузевої науки (гідрології, геоморфології, біології) чи якостей цих об'єктів[18].

---

[18] Це завдання можна порівняти з потребою виокремити з акордів звучання симфонічного оркестру музичну партію групи інструментів одного типу, чи голос окремого інструмента.

Під час дешифрування природних територіальних комплексів (геосистем) стоїть завдання дешифрувати ці системи на підставі розрізняння своєрідних "акордів" ЕМХ за їхніми складовими компонентами, гармонією, дисгармонійністю, інтенсивністю "звучання", стабільністю або мінливістю в часі та просторі.

У разі наземних досліджень географи вже набули певного досвіду розрізняння територіальних окремостей (виділів) – глобального, регіонального та локального ландшафтного рівнів, (геохор і геотопів), зокрема, що репрезентують роботи з фізико-географічного районування та ландшафтознавства. Уже створені відповідні карти фізико-географічного поділу та ландшафтні карти, які з погляду сучасної науки дають певне наближення до реальної структури окремих частин географічної оболонки. Поява методів дистанційого зондування Землі дає змогу вдосконалити ці картографічні набутки і водночас використати їх для розвитку методів дешифрування ландшафтних комплексів на матеріалах дистанційного знімання.

З огляду на те, що природні геосистеми та їхні антропогенні модифікації мають різні ступені подібності, вони піддаються групуванням за виокремленими чи комплексними ознаками, тобто можуть піддаватися класифікації. Такі класифікації в географічних роботах існують, однак принципи їхньої побудови різні. Цей факт має свою позитивну роль для розробки різних підходів і віднайдення оптимальних у класифікації (кластеризації) зображень земної поверхні за допомогою методів дистанційного знімання інформації.

В інтегральному потоці ЕМХ від Землі їхнє розділення на діапазони можливе за допомогою засобів знімання, що мають здатність сприймати певні довжини хвиль. Як було показано у розділі "Знімальна апаратура" певні класи реєстраторів працюють у всьому зоровому діапазоні, або в його частинах, інші – в усьому оптичному діапазоні та в його ділянках, ще інші – в тепловій частині радіодіапазону, чи в надвисокочастотному мікрохвильовому радіодіапазоні. Таке розділення робить можливим вимірювання інтенсивності потоків у широких і вузьких зонах ЕМХ. До цих результатів потрібне знання про фізичні закони формування випромінювання природними тілами і, особливо, про поняття "індикатриси відбиття", "спектральні образи об'єктів", які властиві

природним формаціям у їхніх конкретних генетичних, вікових, фенофазних, часових, композитних та багатьох інших станах.

Для цього складають відповідні атласи, таблиці, еталонні зображення, інші довідкові матеріали. За їхньою допомогою в перспективі можна буде дійти до більш надійного автоматичного дешифрування з використанням комп'ютерних програм.

### *5.7.1. Використання еталонних зображень при дистанційному ландшафтному дешифруванні*

Характер зображень на матеріалах знімання з космосу та його зображувальні якості (яскравісні, фототонові та геометричні) визначається цілим комплексом чинників, пов'язаних з технічними можливостями знімальної апаратури, з природними умовами випромінювання та проходження випромінених хвиль через атмосферу, та передусім – з особливістю будови території, що випромінює чи відбиває промені ЕМХ. Кожен ландшафт характеризується певною географічною структурою, що є порівняно постійною його властивістю. Ця стійкість структури зумовлює відповідну стійкість зображення, особливо таких його ознак, як рисунок, структура та текстура. Рисунок та геометричні риси ландшафту здебільшого визначаються рельєфом, особливо його ерозійним розчленуванням, частково його геологічною будовою, а також ґрунтовим та рослинним покривами, а в умовах України, що має високий відсоток розораної площі – ще й господарським облаштуванням території. Яскравісні властивості зображень є більш мінливими, бо це пов'язано з мінливістю аспектів ландшафтних одиниць, які залежні від фенологічних чи гідрологічних та метеорологічних змін.

Дистанційні матеріали виразно зображають мозаїчність будови земної поверхні. У цій мозаїці можна виявити певні закономірності, які відображають реальну диференціацію земної поверхні на природні комплекси різних розмірів та підпорядкованості. Кожному природному комплексу властивий свій, специфічний рисунок дистанційного зображення. Характер зображення природного комплексу відображає, насамперед, зовнішні риси зображених ландшафтних комплексів, їхню морфологію. Оскільки кожна ландшафтна одиниця є ґеосистемою, в якій все перебуває в

тісному взаємозв'язку та взаємній залежності, то його морфологія та зовнішній вигляд повинні бути тісно пов'язаним з внутрішньою структурою та генезисом даного утворення та їхнім індикатором. Отже, зображення природних комплексів чи їхніх антропогенних модифікацій несе в собі інформацію про географічну суть цих комплексів у всіх її видах, охоплюючи сучасний стан та генетичні прояви.

На будь-якому знімку земної поверхні завжди наявні більші та менші елементи, які називаємо структурними та текстурними елементами зображення. Вони розташовані в певному порядку або хаотично (що також є певним видом порядку), формують своєрідний рисунок, якому можна надавати означення якісні та кількісні.

Серед елементів зображення можна виділяти більш чи менш стійкі елементи, які залишаються незмінними, або залишаються дещо трансформованими на знімках різного часу та виконаних різною апаратурою.

Найбільш стійкими елементами будови ландшафтних комплексів, що залишаються впродовж усього часу їхнього існування, називаємо "каркасом" будови цих утворень. Вони формують своєрідний каркас рисунка дистанційних зображень цих комплексів. Ці стійкі елементи зображень зберігаються до того часу, поки існують природні комплекси цієї якості, тобто доти, доки природні чи антропогенні зміни (трансформації) не приведуть до заміни старої якості на нову. Зазначимо, що розвиток природи в більшості ситуацій проходить еволюційно, а тому риси колишньої структури, яка набула нових якісних властивостей, залишаються на зображеннях і свідчать про певну природну фізіономічну спадковість та генезис території. Прикладами такої ситуації можуть бути території з давньоморенними відкладами, ерозійно модифіковані поверхні, або геокомплекси долинних формацій. Ці приклади можна використати також і для підтвердження специфіки цих територій: мабуть, жоден географ не помилиться в означенні зображення цих територій, бо рисунок їх надто чіткий. Саме в цих якостях зображень закладена можливість побудови системи їхнього розпізнавання, яка ґрунтується на створенні збірки, *атласу еталонів зображень певних типів, класів чи видів ландшафтів.* Зазначимо однак, що найбільш стійкі елементи знімків земної поверхні

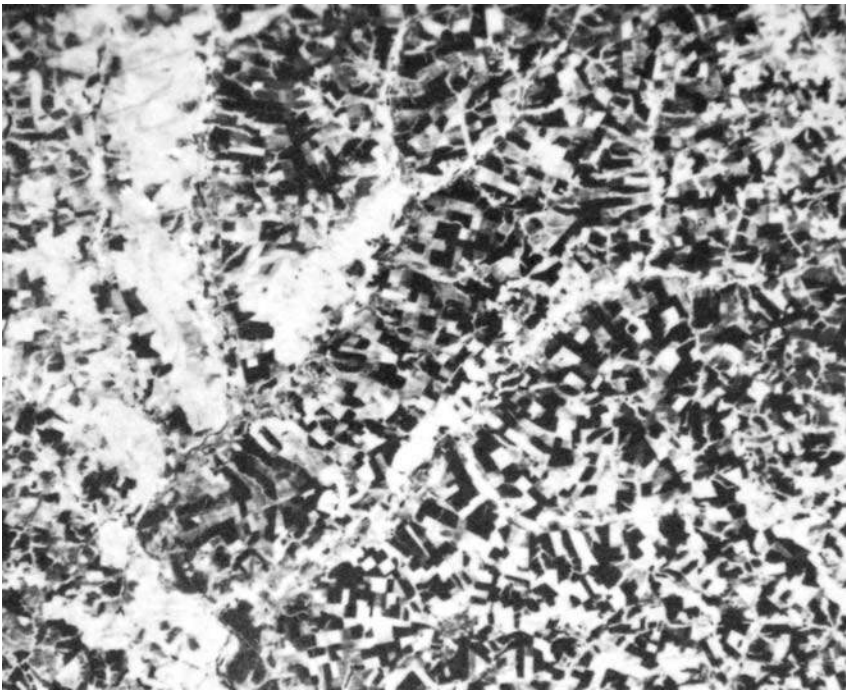


Рис. 5.86. Текстуру зображення створює мозаїка сільськогосподарських полів, однак основний рисунок створюють структурні елементи долин рік, балок та ярів, які добре видні на фоні полів як смуги та дендрити світло-сірого тону.

пов'язані з літогенною основою та гідрографічними елементами (рис. 5.86.).

Менш стійкі елементи знімків формуються менш стійкими компонентами ландшафтних систем, тобто пов'язані з їхніми більш динамічними елементами. Це біотичні елементи та накладені на них впливи сезонних та погодних трансформацій. Водночас саме ці елементи створюють верхній покрив літоґенної основи і є основним елементом РАШ, тобто рослинність разом з ґрунтовим покривом дає основну частку випромінювання, що йде від Землі в космос. Проте специфіка нестійких чи динамічних властивостей зображень полягає в тому, що змінюється не розташування, форма чи розміри елементів, характер рисунка, а гама фототонів, яскравості, кольорів цих елементів. Це природньо, бо і

в разі наземного візуального сприйняття фізіономії ландшафтних комплексів бачимо їхні сезонні чи погодні зміни.

Варто зазначити, що РАШ у різних його станах суттєво змінює свій спектральний образ, а тому під час застосування багатозональної апаратури можна вловлювати та дешифрувати навіть короткочасні (добові та погодні) зміни зовнішнього вигляду, тобто і функціонування природних комплексів.

*Об'єкти еталонування.* Оскільки ландшафтні утворення є різноманітними, по суті, неповторними, індивідуальними, то не потрібно розраховувати на можливість їхньої досконалої ідентифікації дистанційними методами, тим більше, що і наземні методи не дають змоги цього досягати. Прагматичне ставлення до результатів ландшафтного знімання засвідчує, що цього і не потрібно робити на теперішньому етапі розвитку взаємодії природи і суспільства. Наприклад, у сільському чи лісовому господарствах ще не повністю використовують уже набуті знання про природу, ландшафтну структуру території, її фізичні та хімічні властивості. Однак "дорога" спрямована саме туди, до використання знань про потенційні можливості природних формацій, через що науковці повинні підготуватися до цього заздалегідь, використовуючи і наземні, і дистанційні методи досліджень.

Одним з таких способів є виокремлення гомогенних територій, тобто ландшафтних одиниць різних рангів за допомогою систем еталонів дистанційних образів об'єктів (саме ландшафтних одиниць).

Спосіб еталонування, по суті, є комплексним і, водночас, багатоцільовим. Його можуть застосовувати і для більш вузьких потреб, наприклад, для дешифрування геоморфологічних чи гідрологічних якостей. Однак з урахуванням факту формування космозображення через синхронне випромінювання від усіх компонентів будови ландшафтних систем, а не лише від якоїсь її частини, еталонування космозображень є найбільш доцільним саме для природних територіальних комплексів – ландшафтних. Вже наступною стадією може бути дешифрування інформації, необхідної для галузевих наук, виходячи з еталонних зображень ландшафтних комплексів, які складаються з компонентів, що є об'єктом вивчення галузевих наук. Цей спосіб позитивний, корисний для всіх наук з територіальними об'єктами дослідження,

сприяє територіальній узгодженості галузевих характеристик, що є логічним з погляду системної організації природи.

Еталонування природних комплексів є також залежним від роздільної здатності знімків, а тому знімки з меншою роздільною

Рис. 5.87. Знімком охоплена частина Карпат та Передкарпаття на пограниччі з Польщею (видно Солінський водозбірник в долині Сяну у північно-західній частині знімка). Виразно відрізняється Передкарпатська рівнина (північно-східний кут знімка) від гірської частини. В межах гір основними структурними елементами є долини річок та хребти гір. У Верхньодністерських Бескидах та Вододільно-Верховинських Карпатах схили долин безлісі, світлого фототону, мають перистий рисунок, а хребти з хвойними лісами темного фототону, нерівномірної ширини (центральна частина знімка). У Сколівських Бескидах (темний клин справа) долин майже не видно, а хребти зображені темними тонами смерекових лісів і перистим рисунком схилів. Південно-західна частина знімка належить до Полонинисько-Чорногірського середньогір'я, але через покриття буковими лісами зображені світло-сірим перистим рисунком. Кожен із зазначених виділів є своєрідним ландшафтом, сформованим з характерних для нього елементів – схилових, долинних, привододільних на хребтах комплексів.

здатністю потрібно використовуватися для створення еталонів природних систем вищих рангів, а знімки з високою роздільною здатністю – для геосистем середнього та нижчого ландшафтних рангів.

Оскільки різноманітність ландшафтних геосистем на всій земній кулі значна, то створення еталонів космозображень для всієї суші є доцільним лише для геосистем планетарного та регіонального рангів. Уже в межах фізико-географічних регіонів варто вибирати еталони для ідентифікації ландшафтних систем середніх та нижчих рангів (рис. 5.87.).

*Класифікація еталонів зображень.* Теоретичні принципи класифікації еталонних зображень мають важливе значення під час їхнього використання для дешифрування, бо безпосередньо впливають на висновки дешифрувальників стосовно якісних, кількісних чи генетичних властивостей зображень. Зокрема, покладена в основу класифікації еталонів зображень характеристика формальна, наприклад, яскравість чи геометрія об'єктів є можливою, зручною для автоматизованого, але мало придатною для комплексного географічного дешифрування. Для цієї мети найбільш раціонально використовувати морфогенетичний принцип, тобто той принцип, який використовує більшість ландшафтознавців під час створення ландшафтних карт.

### 5.7.2. Характеристика еталонних космічних дрібномасштабних зображень основних типів природних геосистем

*Ландшафти холодних пустель* на знімках мають значну одноманітність, матову текстуру і світлий фотон через порівняно високі значення альбедо. При цьому сухим південним пустелям властиві фототони сірі та світло-сірі, без виразних структурних елементів. Для пустель полярних широт характерні переважно світло-сірі та білі тони, пов'язані з високим альбедо (50–80%) снігу та льоду. На знімках полярних пустинь, зроблених влітку, можуть виднітися темні і чорні плями та смуги в місцях танення снігу та сходження снігового покриву і виходу на денну поверхню скальних гірських порід чи відкладів морських терас. У прибережних частинах полярних гористих островів можуть добре прорисовуватися фіорди (рис. 5.88.).

Рис. 5.88. Острів Гренландія (східний берег) – на знімку NASA Google Earth. Гренландія (Зелена Земля) покрита льодовиковим щитом (зліва) майже повністю, за винятком прибережної смуги. Видно долинні льодовики, що вповзають в трогові долини, трогові долини без льоду та фіорди, заповнені морською водою.

Подібно до полярних пустель виглядають знімки *тундрових ландшафтів* зимою, коли вони покриті снігом. На знімках, зроблених влітку, тундри мають цілком інший і дуже строкатий вигляд через значну і нерівномірну обводненість, кількість термокарстових та міжморенних озер, проявлену гідрографічну мережу та специфічний розподіл рослинного покриву. Ще більш контрастними виглядають тундри весною, коли ще частково наявні плями снігового покриву, та літом, коли в тундрі формується багато озер, повноводніють річки. Добре розрізняються тундрові ландшафти моренних горбів та гряд на фоні рівнинних тундрових просторів завдяки появі слабковпорядкованому з наближенням до дендритового рисунку (рис. 5.89).

Цілком по-іншому виглядає гірська тундра – рисунок тут створюють крутосхилі, розчленовані ерозією гірські блоки. Лісів немає (рис. 5.90). Рослинність бідна і лише в тепліших долинах річок вона багата.

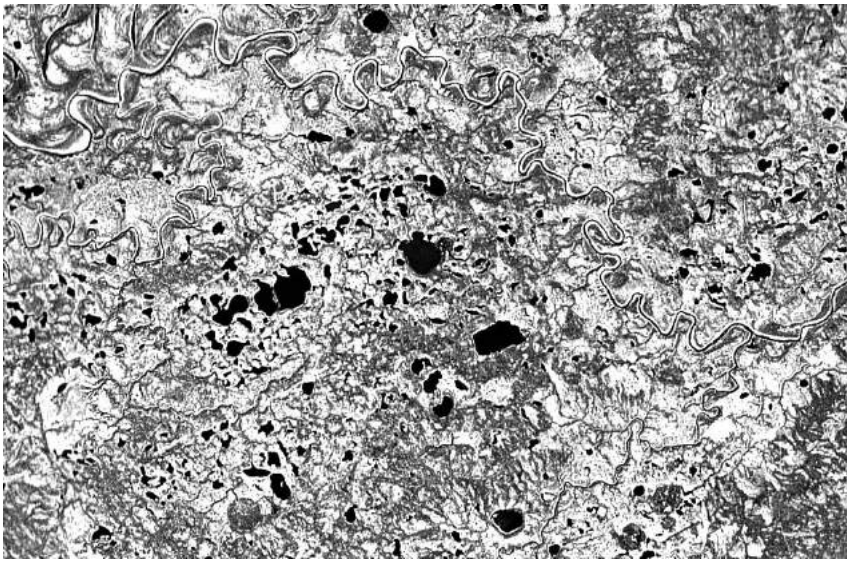


Рис. 5.89. Большеземельська тундра. На майже плоскій низовині багато боліт і озер, що формують плямисту мозаїку. Річки петляють поміж моренними пагорбами. В південно-східній частині – височинна гряда без озер, з короткими дендритами та світлішим фототоном.

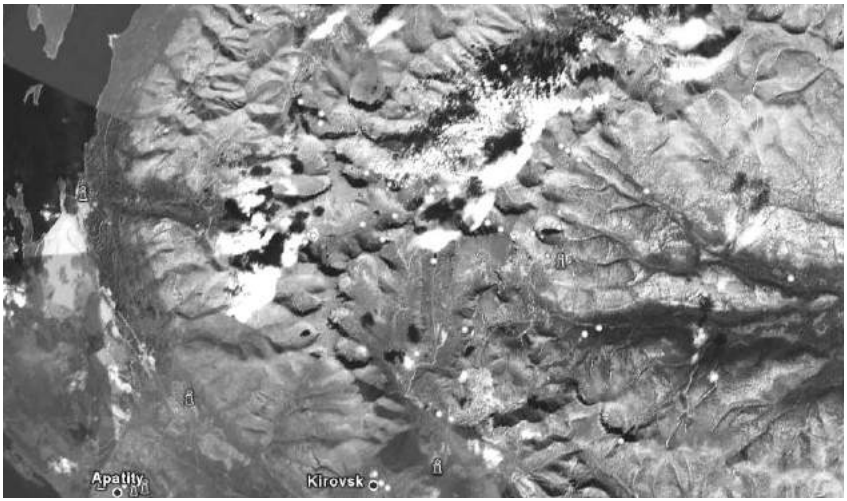



Рис. 5.90. Гірська тундра в Хібінах. Зліва – озеро Імандра. Рисунок знімку створюють розчленовані схили гір, долини річок. Гори безлісі.

*Ландшафтам лісової зони* загалом властивий темний фототон, зумовлений низькими (12–40%) значеннями альбедо лісів. Більш темними тонами зображені ліси хвойні, особливо з переважанням темнохвойних лісоформуючих порід (смерека). Дещо світлішим фототоном відрізняються соснові та кедрові ліси, а на знімках осіннього періоду чітко виділяються модринові ліси в період пожовтіння їхніх шпильок. З огляду на те, що породний склад лісу значною мірою індикує субстрат, за переважанням лісоутворюючих порід природних лісів можна дешифрувати характер ґрунтового покриву.

Світлі плями на темному фоні лісів можуть відповідати пониженим і перезволоженим територіям з трав'яним або чагарниковим покривом. Подібні фототони приурочені також до заплав та нижніх терас рівнинних рік та до вирубок, порослих травою або молодим березняком (рис. 5.91.). Височинні та низовинні ландшафти лісової зони легко розрізняють за наявністю дрібного дендритового рисунка з добре проявленою контрастністю на височинах і мозаїчною плямистістю з розрідженими та "грубшими" дендритами на рівнинах моренних та алювіальних, де ці ознаки (різнотонові плями та прируслові смуги) ще простіші та більші.

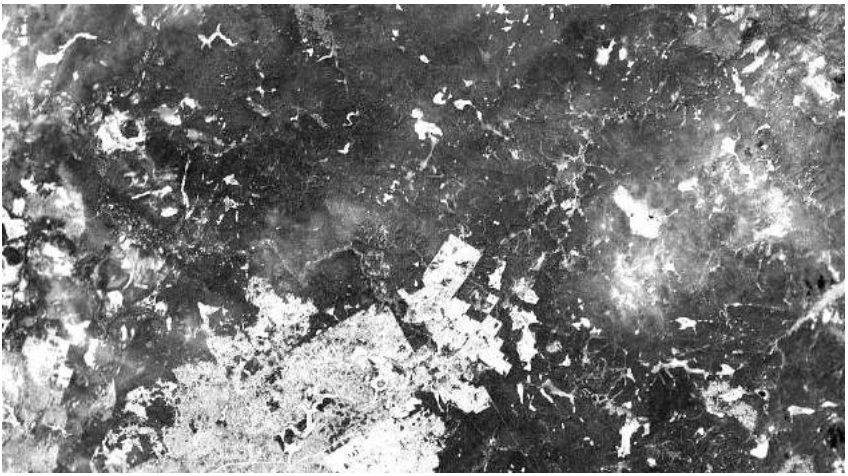


Рис. 5.91. Тайга на південний схід від Архангельська. Темні фототони – хвойні ліси на моренних відкладах. Світлі контури з прямолінійними краями – вирубки. Світлі тонкі прожилки в тайзі – долини потічків, світлі плями – болота.

На темному фоні лісопокритих територій світлими фототонами плям, що часто мають правильні геометричні форми, виділяються вирубки[19], а дуже темними фототонами плям негеометричних форм відображені вигорілі площі лісу.

*Ландшафти підзони мішаних лісів* характеризуються більш світлими фототонами через більше альбедо, яке властиве для листяних деревних порід. Пропорції хвойних та листяних порід значно модифікують тони зображення, роблять їх плямистими чи впорядкованими за дендритовою, або регулярно-мозаїчною схемами, які успадковуються від розгалуженої ерозійної сітки, експозиційних відмінностей чи топокліматичного впливу на розподіл опадів та тепла на височинах. Височинні території мають більше заліснених поверхонь, а тому часто є темнішими (рис. 5.92).

Рис. 5.92. Мішані ліси в Гомельській області Білорусі. Темно-сірими плямами зобразились здебільшого хвойні , а сірими – листяні ліси. Часто вони створюють мозаїчні контури. Світлі геометричні контури – безлісі і розорані території. Дендрити долин річок – темні.

[19] На знімках територій лісової зони, виконаних у період залягання снігового покриву, усі вирубки та інші безлісі площі виразно прорисовуються білими фототонами на темному фоні лісів.

*Ландшафти лісостепової смуги*, яка приблизно збігається з перигляціальною смугою, відрізняються від попередніх значною антропогенною модифікованістю, яка полягає в значній кількості елементів зображень з геометричними формами: поля, лінійні границі лісів, які доцільно, продумано узгоджені (видно за їхніми розмірами та орієнтацією) з природним рисунком ерозійної сітки, річковими системами, специфічним рельєфом. На цій території розорані майже всі придатні для рільництва площі, а тому на знімках видно геометрично правильні елементи (переважно прямокутники різних співвідношень ширини і довжини), які мають різні відтінки фотонів чи кольорів, що пов'язано з різними сільськогосподарськими культурами чи агротехнічним станом полів. Території зосередження полів розмежовані криволінійними смугами та довільних форм плямами природно-зумовлених формацій: річково-долинної мережі з луками, приозерними зни-

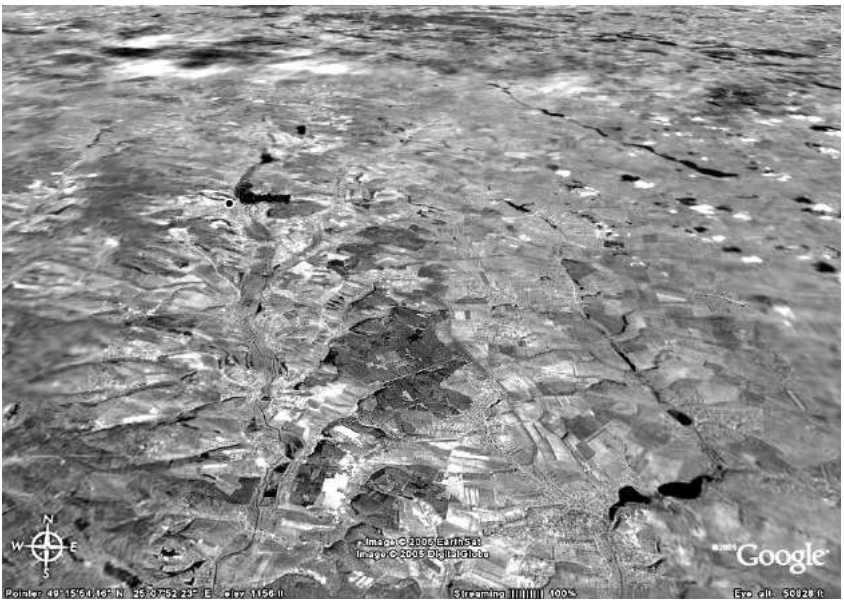



Рис. 5.93. Територія Бережанського горбогірного (західна частина знімка) і Тернопільського хвилясто-платового ландшафтів (східна частина), лісостепових за характером рослинного покриву (знімок подано з використанням опції відхилення візирної осі від нормалі).

женнями та темними плямами лісів, що збереглись на схилах височин через недоступність для землеробства, або й на рівних привододільних поверхнях, збережених доцільно, для забезпечення лісовими ресурсами (рис. 5.93). Для детальнішого дешифрування зображень цих територій вигідно використовувати знімки, виконані в різні сезони року, коли природна і культурна рослинність, перебуваючи у різних своїх фенофазах, змінює свої аспекти.

*Степові ландшафти (степи, прерії, савани).* Фотографічні та телевізійні зображення степів характеризуються значною одноманітністю і в зимовий, і в літній час через відсутність контрастних рослинних покривів, найважливіше – через відсутність лісів. Фототон степів здебільшого сірий, відтінки якого варіюються залежно від рослинного покриву: його яскравістю, аспектом кольору, життєвістю, фенофазою, густотою, проективним покриттям, "просвічуванням" ґрунту і його станом (рис. 5.94.).

Найбільшими елементами зображення степових ландшафтів на дрібномасштабних знімках можуть бути річкові долини, де

Рис. 5.94. Заповідні степи Асканії Нової. Там, де нема господарської діяльності (будівель, парків, доріг, водозбірників), тон зображення сірий та одноманітний.

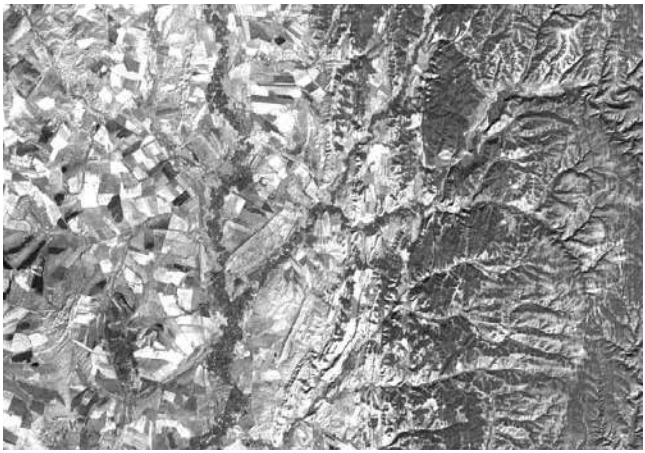
рослинність виразно відрізняється через добрі умови зволоження. У сухих степах, особливо на рівнинах з морськими четвертинними відкладами, своєрідний плямистий рисунок може виникати через наявність степових блюдець та яскравих плям солончаків, які добре видно на знімках середньої та високої роздільної здатності.

У тих степах, які зайняті сільськогосподарськими угіддями, структуру зображення формують геометрично правильні контури орних земель, розміри та орієнтація яких залежить від рельєфу поверхні. На плоско-рівнинних територіях поля, зазвичай, великі, прямокутні за формою і стабільні за орієнтацією (рис. 5.95). Чим більше хвиляста територія, тим сильніше проявляється здрібненість полів, значний відсоток становлять поля з відхиленням від прямокутної форми: трапеції, трикутники, криволінійні смуги, овали, а їхня орієнтація подібна до орієнтації елементів форм рельєфу.

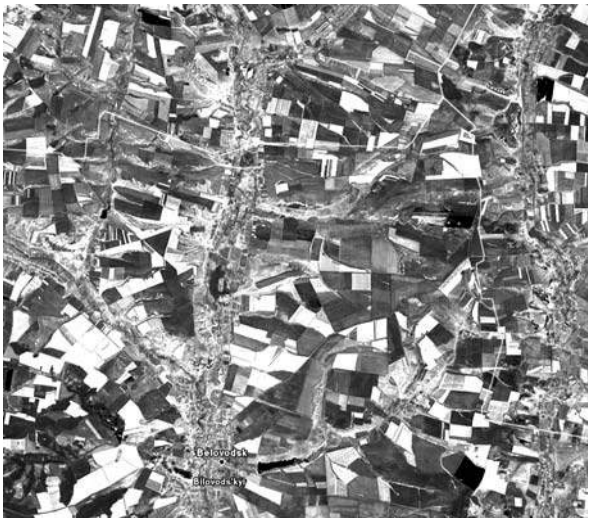
У тих степових ландшафтах, які мають поверхню височинну, розчленовану глибоко врізаними ерозійними формами, в умовах достатнього зволоження можуть формуватися так звані байрачні ліси на днищах і крутих схилах балок та ярів. У цьому разі ерозійні форми на знімках середньої роздільної здатності добре прорисовуються темними фототонами (на відміну від ерозійних форм у лісовій зоні, де через перезволоження днища долин можуть бути безлісі, з трав'яним покривом, а тому виділятися світлими фототонами).

*Ландшафти напівпустельні та пустельні* вирізняються сірим безструктурним фототоном. Особливо виразно виділяються міжгірні пустелі, оточені контрастним зображенням гірських ландшафтів. Так зображаються пустелі на дрібномасштабних знімках. Порівняно світлий фототон пустель та напівпустель зумовлений світлими пісками (альбедо 20–35 %). Подібно зображені також глинисті та кам'янисті пустелі, оскільки дрібні елементи поверхні цих пустель не зображаються на знімках. Зазначимо, що кам'янисті пустелі мають біль темний фототон, ніж піщані. На знімках середньої та високої роздільної здатності, виконаних у весняний період, чітко розпізнають такири.

На знімках середнього та великого масштабів стають виразними структура і текстура зображення, характерні для еолового рельєфу. У різних пустелях вони відрізняються орієнтацією і впорядкованіс-



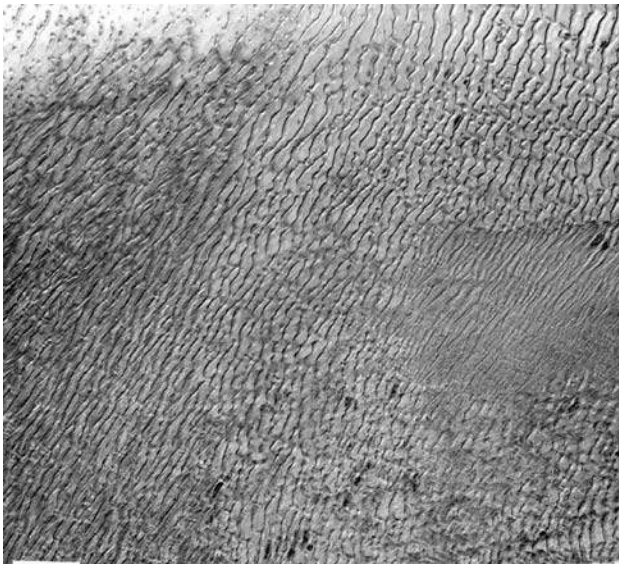
*а*



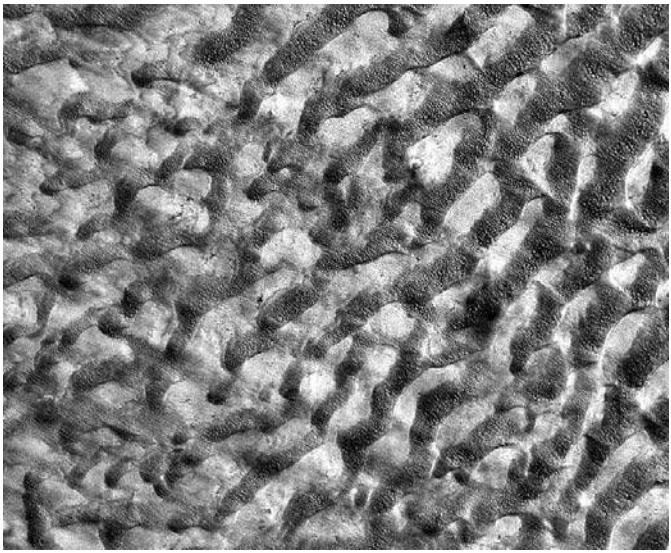

*б*

Рис. 5.95. Степові ландшафти:

*а* – Оренбурзькі степи (західна частина знімка – добрі ґрунти, майже повністю розорані, хоч їхня поверхня досить складна. В долинах рік – багата рослинність (темні смуги і дендрити). Контрастно виглядає Південний Урал (східна частина знімка), де немає геометричних прямокутників полів, але інтенсивно проявилися гористі пасма та дендрити річкових долин; *б* – степи Луганської області України. Зображення подібні наявністю прямокутних полів та дендритами ярково-балкових форм.



*а*



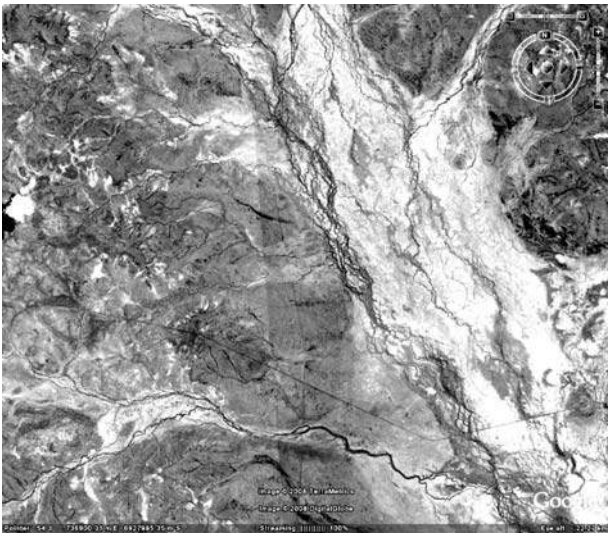
*б*

Рис. 5.96. Вигляд пустелі з піщаними пасмами:
*а* – різні системи пасм за морфометрією та орієнтацією, залежні від систем вітрових течій та субстрату; *б* – збільшене зображення пасм.

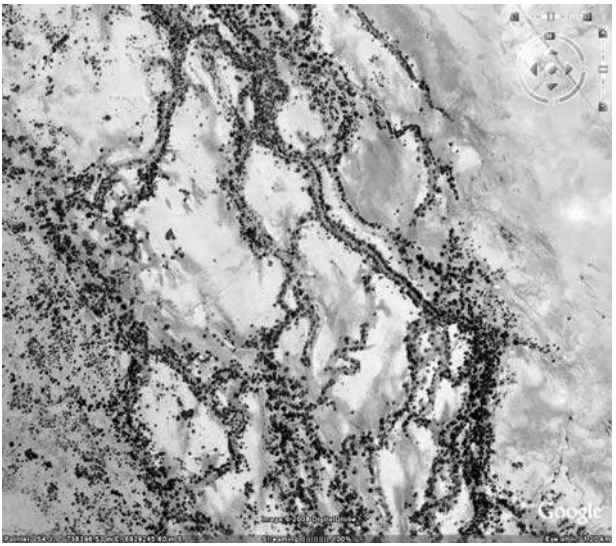
тю барханних гряд, валів, скупченістю чи розрідженістю барханів, їхніми розмірами, вираженістю власних тіней (рис. 5.96).

*Передгірні ландшафти* дешифрують за сусідством гірських систем, які виразно видні на дистанційних знімках, а також за специфічним рисунком, що формується річковою мережею. Розташовуючись на переході від низовин і рівнин до гір, передгірні ландшафти в більшості випадків височинні. Через збільшену кількість опадів, яка також характерна для передгір'їв, ці височини мають густу та глибоку ерозійну сітку, яка створює характерний дендритовий рисунок. З цієї ж причини (більше опадів) передгірним височинам властива більша залісненість. Залежно від зонального розташування передгір'їв та від ступеня відносного підняття над навколишніми нижчими рівнями на їхніх височинах найчастіше формується рослинність, яка характерна для наступної природної зони в напрямі на північ:

- у пустель регіонах на передгір'ях можуть формуватися степові аспекти, що зумовлює більш світлі фототони (залежно від пори року). Це характерно для передгірних регіонів Середньої та Центральної Азії, Австралії (рис. 5.97).
- у степових регіонах на передгірних височинах появляються деревні зарослі по ярах, або великі масиви дрібнолистих лісів на всіх елементах рельєфу, що створює дендритовий рисунок і плямистість темніших відтінків (передгірні височини Алтаю, Кавказу, Південного Уралу та Мугоджар);
- на передгір'ях у лісовій зоні, зокрема, у широколистих лісах на навколишніх нижчих рівнях появляються хвойно-широколистяні та хвойні ліси з відповідним згущенням темних фототонів (Південний Урал, Передкарпаття);
- у межах поширення хвойних лісів передгір'я виглядають світлішими через зменшення лісистості, що властиве для лісотундр (Середній Урал);
- на північних передгір'ях у зоні лісотундри і тундри виявляється ще більше висвітлення зображення через переважання чагарниково-трав'яної рослинності та мохово-лишайникового покриву каменистих розсипів чи дрібнозему (Північний Урал);
- у зоні полярних пустель вже на невисоких рівнях можуть формуватися тундрові гольці ("голі"), без рослинних пок-



*а*



*б*

Рис. 5.97. Зображення тропічних саван Австралії:
*а* – широкі передгірські долини з великою кількістю блукаючих русел рік, що пересихають (кріки); *б* – збільшений фрагмент цієї ж долини, де видно зарослі чагарників вздовж русел кріків.

ривів поверхні елементів рельєфу), або сніговий та льодовиковий покриви з яскравими білим фототоном (нівальний пояс). Наявність або відсутність льодовикових щитів залежить від кількості твердих опадів, рельєфу та температурного режиму арктичних островів. Прикладами можуть слугувати всі острови Північного льодовитого океану – від багатих на опади островів з льодовиковими щитами західного сектора Арктики до бідних на опади островів, що прилягають до Сибіру, які не мають льодовикових щитів.

*Гірські ландшафти* мають специфічний характер, за яким всі, навіть недосвідчені дешифрувальники, їх легко відрізняють від ландшафтів рівнин. Водночас ландшафти гір різноманітні, що пов'язано з відмінностями тектонічної та геологічної структури гірських формацій. Для більшості гір властивий перистий характер компонування структурних елементів, які до того ж є контрастними за фототоном. Кожен гірський хребет має свою повздовжню вісь, від якого відходять більші чи менші бокові відгалуження, які також розчленовані. Саме характер розчленування гір створює властивий їм складно-смугасто-перистий рисунок, що зумовлено протяжністю хребтів, їхньою висотою, розгалуженістю. Контрастність елементів рисунка виникає через різний степінь освітленості сонячних схилів та схилів іншої орієнтації, що перебувають у власній тіні. В середньовисотних і низьких горах, покритих лісовою рослинністю, дуже добре розрізняються безлісі частини гір (хребти з природними полонинами в Карпатах), та схили і днища долин, де безлісся антропогенне. За характером фотонів або кольорів на кольорових знімках легко вирізняються тепліші та холодніші сектори гір: наприклад, Закарпаття з переважанням букових лісів завжди виглядатиме світлішим порівняно з північним макросхилом Карпат, де переважають смерекові ліси з темним фототоном. Можна розрізнити також висотні рослинні пояси, якщо їхнє формування не порушене монокультурними лісопосадками (рис. 5.98).

У високих горах, де наявний нівальний висотний пояс, та в середньовисотних і низьких горах весною і восени формується виразний фізіономічний рисунок хребтів через встановлення або затримання на них снігового покриву. При цьому значно посилюється контраст поміж високими рівнями хребтів, що мають

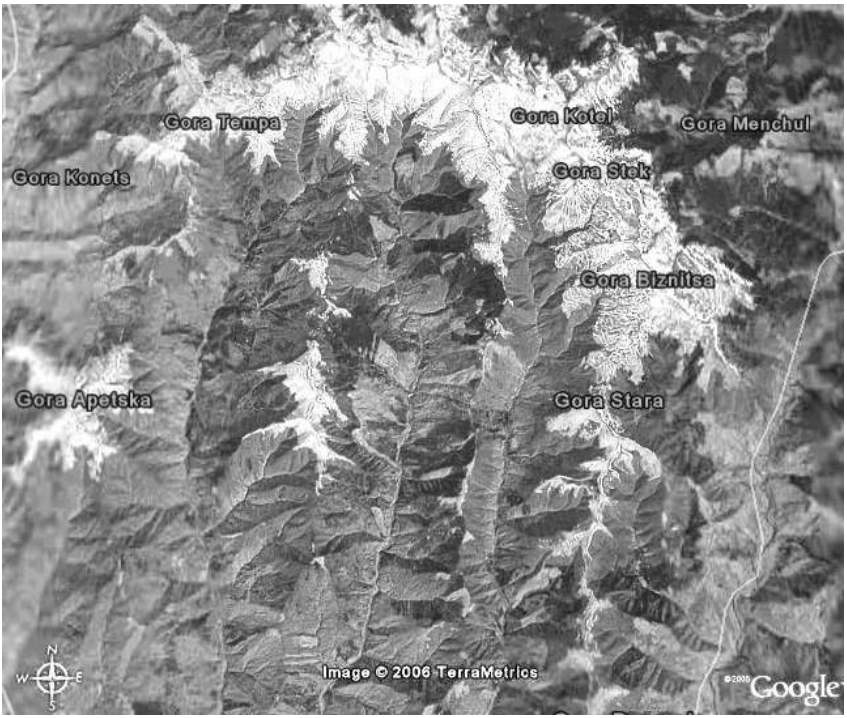



Рис. 5.98. Хребет Свидовець з південного боку весною. Видно засніжені хребти з субальпійськими луками, нижче цього поясу – пояс букових лісів (знімок з використанням опції відхилення візирної вісі від нормалі).

білі фототони та міжгірними долинами, де снігу може не бути, а ліс підсилює темні тони на знімках (див. рис. 5.98).

У тих горах, де формуються гірсько-долинні льодовики, вони також додають контрастності через "вповзання" світлих "язиків" льодовиків вниз по долинах, де загальний місцевий спектр фототонів є набагато темнішим. У зимовий період, коли льодовики покриті снігом, їх важко відрізнити від решти покритої снігом території. У літній період льодовики відрізняються приуроченістю до долин, оточенням темними фототонами схилів не покритих снігом, а на фоні засніжених схилів трохи темнішим фототоном з ще темнішими краями, одним чи кількома вузькими темними смугами серединних морен (рис. 5.99).

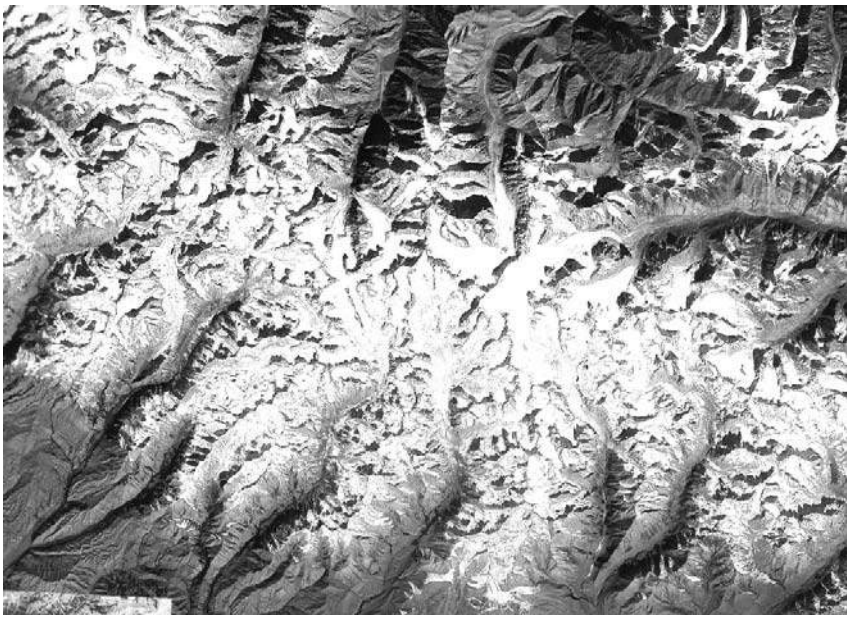
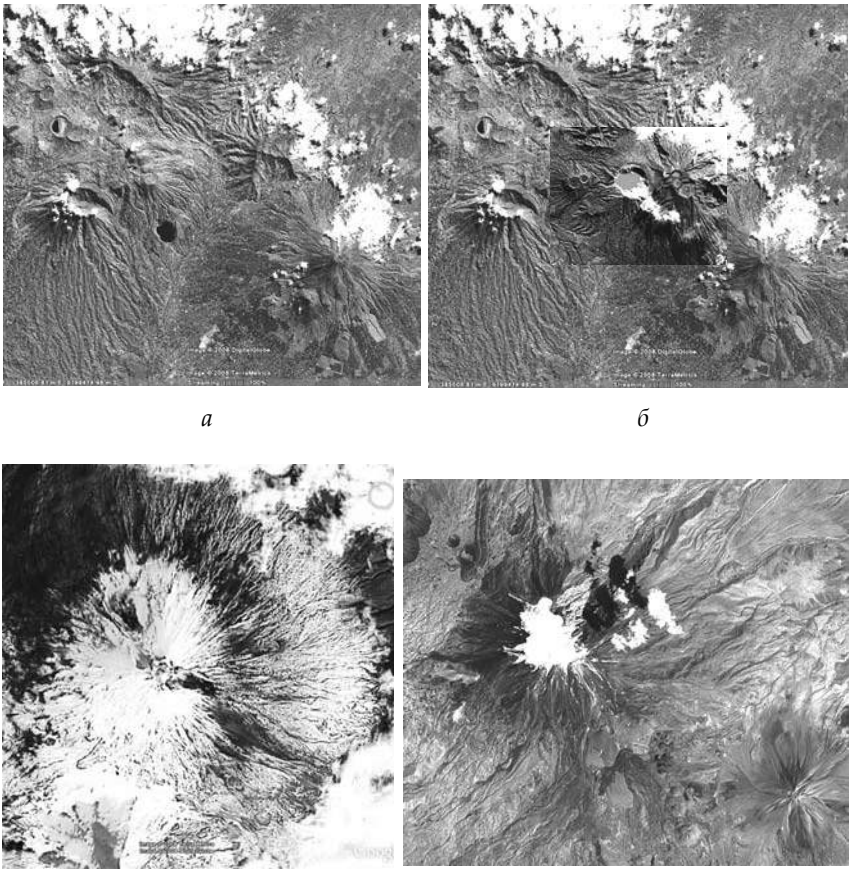


Рис. 5.99. Фрагмент системи хребтів Тянь-Шаню з висотами, що залягають вище від снігової лінії (білі). Видно невеликі льодовики. Нижчі рівні – темно-сірі з рельєфом, залежним від геологічних відкладів та їхньої податливості до ерозії.

У горах сухих областей з бідною рослинністю або без неї зберігається перисто-організований рисунок контрастно освітлених схилів, характерний для розчленованих гір. Фототони в таких горах відображають не висотну рослинну поясність, а структуру геологічних корінних порід та приповерхневих відкладів.

Специфічне зображення на знімках мають ландшафти вулканічних областей. Їхніми характерними рисами є наявність вулканічних гір з властивими для вулканів формами: конусоподібними вершинами, що стоять одиноко чи групами і не утворюють хребтів, характерних для складчастих гір. На вершинах цих конусів добре помітне кільце кратера, а на схилах – радіальний рисунок елементів, сформованих лавовими потоками та водною ерозією. У групах вулканів можуть траплятися кальдери – залишки вибухлих вулканів з кільцевою основою (чи нижньою частиною), в якій може формуватися озеро (рис 5.100).



*а* *б*

*в* *г*

Рис. 5.100. Ландшафти у вулканічних зонах:
*а* – низькі вулкани на островах Індонезії, *б* – високі вулкани там само (абс. висоти вершин 1–3 тис. м). Видно кальдеру з озером, білі плями – хмари. Схили вкриті лісами; *в* – вулкан Ключевська Сопка (висота 4 750 м) на Камчатці зі схилами, вкритими снігами; *г* – вулкан Арарат (висота 5 165 м) у Туреччині.

Залежно від природної зони, де сформувався вулкан, його зовнішній вигляд може суттєво відрізнятися. Зокрема, вулкани північні часто вкриті снігами і мають білі фототони, а вулкани екваторіальних областей бувають вкриті лісами і мають темно-сірі фототони (див. рис. 5.100).

Інші оригінальні ландшафтні комплекси можна зустріти на узбережжях морів тих держав, де територія невелика, і де є дефіцит території для господарського використання. За таких умов люди навчилися технічно нарощувати територію, відвойовуючи її від моря технічними спорудами і штучним намивом (Японія), або використовуючи природні процеси та їхню корекцію (Нідерланди), де нижчі від рівня моря марші відгороджують від моря і нарощують їхню висоту, спрямовуючи туди винос річками намулів (рис. 5.101).

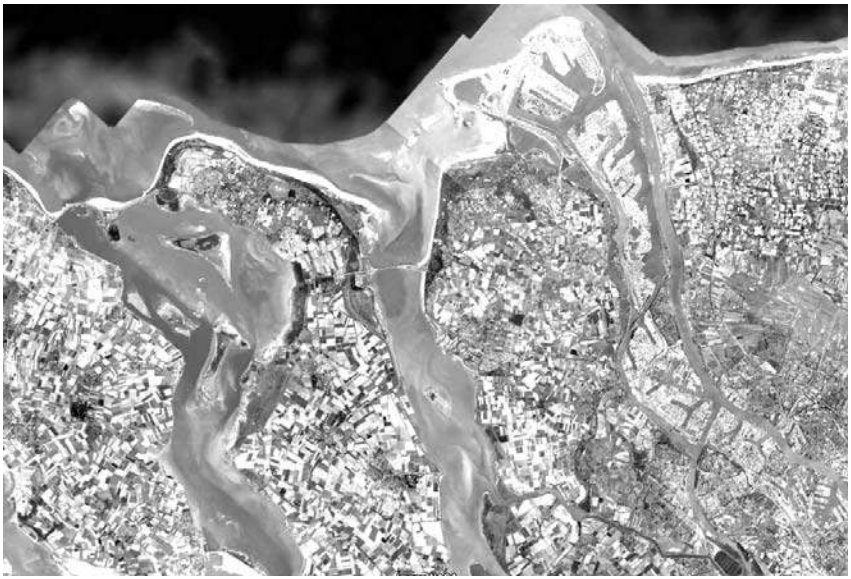


Рис. 5.101. Узбережжя Нідерландів (низькі землі з *нім.*) з нарощеними берегами, островами, півостровами. Землі використовують під поля, лісопарки, поселення. Характерні для антропогенних об'єктів лінійні та площинні геометричні форми.

## 5.8. Аерокосмічні дослідження в океанології

Сьогодні космічні дослідження приносять великий об'єм інформації про океани і моря Землі. Вони дають змогу глобально оглядати поверхню океанів і виявляти характерні природні явища

та закономірності, пов'язані з поверхнею і глибинами океанів. Традиційні методи дослідження океану з використанням науково-дослідних суден та автономних буїв не можуть охопити постійними вимірюваннями акваторію всього океану і навіть малих його частин.

На зміну традиційним методам почали приходити спочатку спостереження з літаків, а потім – з космосу. До 70–80-х років минулого століття сформувався цілий науковий напрям – дистанційне зондування океану. З 1970 р. стали доступні інфрачервоні знімки океану зі супутників NOAA з просторовою і термічною роздільною здатністю, достатньою для якісного оцінювання горизонтального перенесення в приповерхневому шарі океану і візуалізації динамічних структур, що виявляються в полі температури поверхні води. Перші радіолокаційні зображення океану з космосу були отримані радіолокатором із синтезованою апертурою SAR під час польоту американського супутника Seasat в 1978 р. і дали змогу вивчати хвилювання [12]. Нині дистанційне зондування океану – один з напрямів досліджень Землі, який швидко розвивається.

Коло питань можливого використання космічної техніки у вивченні океанів вкрай широке, рішення більшості завдань потребує спеціальних режимних спостережень зі супутників. Для постійного стеження за станом океану на орбіті працюють супутники з апаратурою у широких діапазонах ЕМХ (табл. 5.8.1).

Визначимо такі *напрями використання космічних знімків в океанологічних дослідженнях*: 1) вимірювання температури і солоності океанів; 2) спостереження за напрямком течій і рівнем океанів; 3) виявлення фронтів, фронтальних зон і вихорів в океані; 4) апвелінгу; 5) дешифрування кольору океану; 6) визначення глибин шельфу і рельєфу дна океанів; 7) вивчення морського хвилювання; 8) надводного вітру; 9) дослідження льодових полів та поширення айсбергів; 10) картографування морських та океанічних берегів.

*Температура і солоність* поверхні океану є найважливішими характеристиками морської води. Для динамічної океанографії важливо знати розподіл щільності, яка визначає рух водних мас, а щільністю морської води є функція її температури і солоності.

*Таблиця 5.8.1.*

Види супутників та апаратури для знімань фізичних явищ Світового океану [129].

| Поля і явища Світового океану | Параметри і характеристики | Давач /Супутник |
|---|---|---|
| Температура поверхні океану | Температура поверхні океану | ІЧ-радіометри, спектрорадіометри AVHRR / NOAA, ATSR/ ERS-1-2, AATSR/Envisat, MODIS/Terra, Aqua та ін. |
| Солоність на поверхні океану | Солоність | СВЧ-радіометри |
| Морські течії Динаміка водних мас | Швидкість і напрям течії, морфологічна структура | Теплові ІЧ-радіометри AVHRR / NOAA радіолокатори РСА і радіовисотоміри |
| Рівень морів | Аномалії поля рівнів, коливання рівнів | Радіовисотоміри ALT/Topex-Poseidon, RA/ ERS-1-2 та ін. |
| Стан поверхні морів, хвилювання | Довжина, висота і напрям розповсюдження хвиль | Радіолокатори РСА, СВЧ-радіометри, альтиметри SAR/ERS-1-2 і Envisat, SSM/I/DMSP, ALT/Topex-Poseidon, RA/ERS-1-2 |
| Приводний вітер | Швидкість і напрям вітру | Скаттерометри і СВЧ-радіометри SCAT/ERS-1-2, NSCAT/ADEOS, QuickSCAT/SEAWIND, SSM/I/DMSP та ін. |
| Колір води, біопродуктивність | Колір води, концентрація хлорофілу фітопланктону, концентрація суспензії | Багатозональні сканери і камери CZCS/Nimbus, SeaWiFS/SeaStar, MERIS/ Envisat MODIS/Terra, Aqua, ADEOS |
| Морські льоди | Форми рельєфу дна мілководого шельфу, морфологія дна Світового океану | Багатозональні камери і сканери, радіовисотоміри ScaSat, ERS, EnviSat |
| Мезо- і дрібні явища на морській поверхні | Параметри явищ | Радіолокатори SAR, РСА Алмаз, ERS-1-2, Radarsat Envisat та ін. |

Вимірювання температури океанів виконують радіометрами в ближньому та середньому інфрачервоному діапазонах. На інфрачервоному зображенні холодні об'єкти передані світлішими тонами, а теплі виглядають темнішими. Для отримання кількісних даних про температуру використовують каліброваву шкалу. Проведення таких досліджень можливе лише за умови ясної погоди, оскільки інакше фіксують температуру поверхні хмар. Глобальні супутникові фотокарти температур морської поверхні SST (Sea Surface Temperature) складають за знімками AVHRR/NOAA з 1981 р., а з 2001 р. їх створюють в реальному масштабі часу на основі багатоканального алгоритму визначення температур і використовують в оперативних цілях.

Розподіл температури води одночасно на акваторіях всіх морів і океанів є головною діагностичною ознакою для прогнозу ділянок з найбільш вірогідними рибними скупченнями. Для забезпечення картами температури поверхні океану території північно-західної Атлантики в Канаді була розроблена автоматизована система Галіфакс. За даними супутника NOAA (з урахуванням поправок суднових спостережень), вона виконувала карти в ізолініях температури з дискретністю 3–4 дні і передавала на риболовецькі судна. Нині щоденні глобальні і регіональні карти температури морської поверхні доступні в мережі Інтернет, наприклад: http://www.remss.com/sst/sst_data_daily.html (рис. 5.102).

Наукові дослідження температури океану передбачають також вимірювання радіаційного балансу системи океан–атмосфера.

*Солоність* і температура зумовлюють щільність морської води, яка є найважливішим чинником, що визначає рух водних мас в океанах. Океанічна циркуляція відіграє вирішальну роль у формуванні клімату Землі і його змін. Солоність поверхневого шару води залежить від співвідношення опадів і випаровування.

Дистанційне визначення солоності поверхневих вод океану випливає з низки експериментальних. Оскільки безпосередні вимірювання цього параметра досить складні і ніколи не виконувалися з великим просторовим обсягом і повторюваністю, супутниковий моніторинг солоності виправданий. Проте методів дистанційного вимірювання солоності з необхідною надійністю і точністю поки що не має. Сьогодні Європейське Космічне Агентство (ЄКА) розробляє програму SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity – вологість ґрунтів

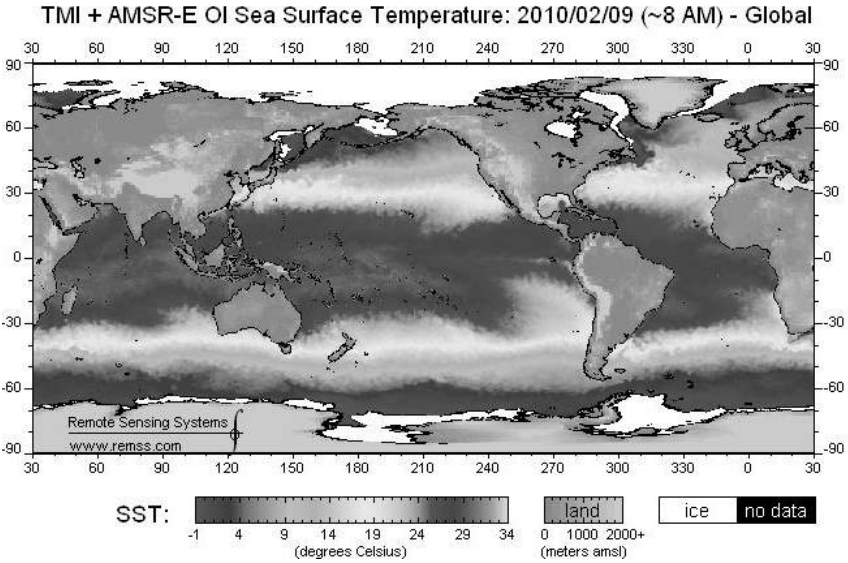



Рис. 5.102. Знімок температури поверхні Світового океану станом на 2 вересня 2010 р.
Найтепліша водна поверхня (30° і більше) в акваторії Індійського океану на півночі о. Мадагаскара та біля західного узбережжя Зондських островів, в районі островів Французької Полінезії (Тихий океан), на півночі Гвінейської затоки та біля південно-східного узбережжя Бразилії (Атлантичний океан).

і солоність океану), яка передбачає використання на однойменному супутнику інтерферометра-радіометра MIRAS (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis). Радіометр вимірює вологість ґрунтів в глобальному масштабі з роздільною здатністю 60 км і солоність морських вод із розрізненням 200 км. Він також міряє власне випромінювання поверхні Землі в L-діапазоні (21–23 см). Розрахунки значень солоності проводять на основі виміряних значень температури яскравості в L-діапазоні при різних кутах нахилу і поляризації приймальної антени. Принципи визначення солоності на основі дистанційних вимірювань, покладені в основу програми SMOS, детально викладені J. Font (http://www.icm.csic.es/geo/gof/projects/smos/JF_Porto_2003.pdf). Знімання за програмою SMOS ЄКА розпочато у 2008 р.

*Спостереження за напрямом течій*. Головні причини, що викликають морські течії, поділяють на зовнішні і внутрішні. До зов-

Рис. 5.103. Віддзеркалення водною поверхнею сонячних променів, за яким можна спостерігати потужну течію Гольфстрім.

нішніх сил належать вітер, атмосферний тиск, припливноутворювальні сили Місяця і Сонця; до внутрішніх – сили, які виникають унаслідок нерівномірного розподілу по горизонталі щільності водних мас.

Окрім зовнішніх і внутрішніх сил, які викликають морські течії, відразу ж після виникнення руху вод виявляються вторинні сили, до яких зачислюють силу обертання Землі (силу Коріоліса), яка відхиляє рух природних об'єктів, і силу тертя, що уповільнює всякий рух. На напрям течії впливають також конфігурація берегів і рельєф дна. Виконують вимірювання також поля течій, під яким розуміють розподіл сумарного вектора швидкості перебігу на акваторії Світового океану.

"Побачити" течії на космічних знімках виявилося можливим завдяки реєстрації температур поверхні інфрачервоними радіо-

метрами – за такими знімками визначають ширину струменя, меандри, супроводжуючі течію вихори (ринги), грибоподібні течії. Для кількісних вимірювань поля течій з космосу, визначення напряму і швидкості руху води застосовують інтерферометричні системи на основі радіолокаторів з синтезованою апертурою.

Океанічні та морські течії дешифрують за прямими ознаками, спостерігаючи безпосередньо за їхнім зображенням на космічних знімках. Наприклад, простежують різне віддзеркалення сонячних променів водною поверхнею залежно від її шорсткості, пов'язаної з поверхневими течіями (рис. 5.103). На знімках добре відображається перетікання вод Червоного моря через Баб-ель-Мандебську протоку і їхнє перемішування в поверхневих шарах Аденської затоки з водами Індійського океану.

Течії в океані можна спостерігати за непрямими ознаками – зміною температур або за ламаними льодами, які переміщуються течіями, зваженими мулистими частинками, фітопланктоном (так званими трассерами). Течії фіксують давачами, які працюють у видимому і тепловому інфрачервоному діапазонах. Аномалії рівня океану визначають за допомогою космічних альтиметрів (висотомірів).

Непрямими ознаками течій є також їхнє узгодження з хмарністю. Наприклад, на знімках берегів Каліфорнії переміщення охолоджених океанічних вод з півночі на південь уздовж Каліфорнійського побережжя знайшло відображення завдяки тому, що воно супроводжується утворенням і переміщенням в тому ж напрямі низької шарувато-купчастої хмарності. Власне тісний зв'язок між хмарністю та океанічними течіями був встановлений за допомогою дистанційного аерокосмічного знімання.

Раніше океанічні течії спостерігали за даними супутників, які фіксували положення буїв з електронними давачами чи радіопередавачами. За переміщенням сигнальних точок визначали океанічні течії. Проте такі спостереження важко систематично проводити.

Непрямими ознаками проходження течій є винесення річкових наносів, добре видиме на знімках. Довгі шлейфи мулистого матеріалу вказують на напрям течії, яка розносить річковий мул вздовж прибережної смуги. Зокрема, аналізуючи знімки течій в північно-західній Атлантиці, за переміщенням наносів

вздовж берегів Північної і Південної Кароліни визначили чіткі межі Гольфстріму.

За знімками можливе дослідження не тільки напряму течій, а й їхньої швидкості. Для цього використовують так званий метод псевдопаралаксів. Його суть полягає в інтерпретації стереопар знімків, зроблених з певними інтервалами часу і наявності деяких маркувальних крапок у воді. Такими маркувальними крапками можуть бути крижини на воді. Помилковий стереоефект, який при цьому отримують завдяки дрейфу крижин, дає змогу проводити вимірювання швидкості течії.

Для вивчення течій, які зазвичай мають температурні характеристики, відмінні від навколишніх акваторій, перспективним є використання теплового знімання. На інфрачервоних знімках з метеорологічних і ресурсних супутників вперше вдалося реально побачити Гольфстрім зі всіма деталями руху вод цієї течії. На основі інтерпретації космознімків детально закартували й інші теплі і холодні течії Світового океану.

*Вивчення рівня океану.* Причинами, які викликають коливання рівня, особливо біля узбережжя океанів і морів, є: приливи і відливи, вітрове наганяння і зганяння води, зміна атмосферного тиску, течії, сейші, зміна щільності води. Сезонні коливання рівня багатьох морів пов'язані з температурним розширенням-стисненням водою маси, а глобальні кліматичні зміни викликають багаторічні коливання рівня Світового океану, вивчення яких нині особливо актуальне і ведеться за допомогою радіоальтиметрів.

Завдяки супутниковій радіоальтиметрії вперше отримали глобальну десятиденну картину топографії поверхні океану з точністю до 5–10 см. Це дає змогу визначати відхилення рівня водної поверхні від геоїда, досліджувати вихрову структуру загальної океанічної циркуляції, виявляти руйнівні хвилі цунамі задовго до їхнього наближення до берега, стежити за приливами в зонах континентальних шельфів, штормовими наганяннями і деформаціями рівня, пов'язаними із західними прикордонними течіями та їхніми меандрами.

Супутники Topex/Poseidon (запуск 1992 р.) і Jason-1 (запуск 2001 р.), розроблені спільно NASA і космічним агентством Франції CNES, забезпечують глобальну картину рівня поверхні океану кожні десять днів з точністю близько 4 см (рис. 5.104). Радіолокатор супутника Topex/Poseidon вимірює час проходження радіосигналу

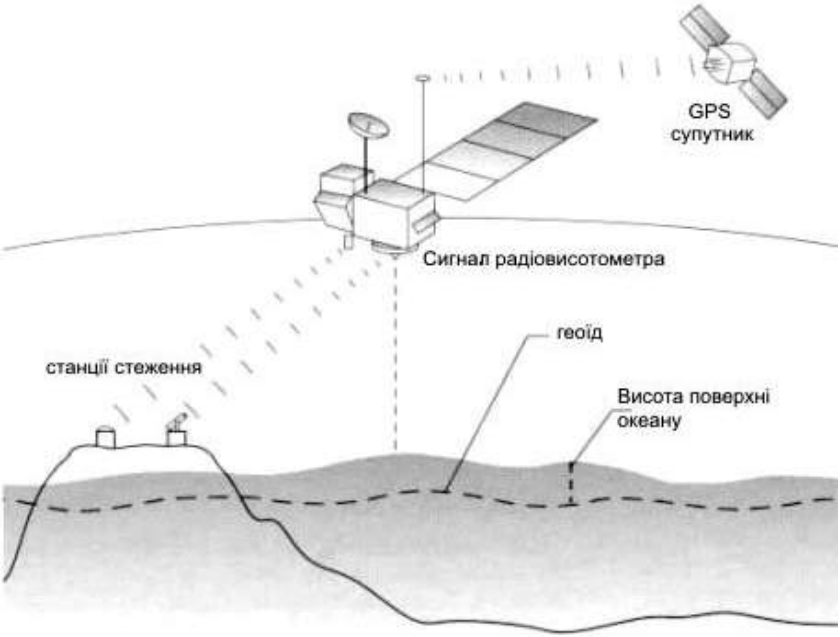



Рис. 5.104. Принципова схема стеження за рівнем океану за допомогою вимірювальної системи Topex/Poseidon.

від супутника до поверхні океану і навпаки. На основі набутих значень і точних даних про орбіту обчислюють висоту поверхні океану як різницю між висотою орбіти і висотою супутника над поверхнею океану.

Нахил орбіти (66°) дає змогу супутнику бачити 95% вільної, не покритої льодами, поверхні Світового океану. Через кожних десять діб апарат з точністю повторює свій маршрут.

Дані зі супутника використовують для оперативного спостереження і прогнозу цунамі, штормових нагонів води, моніторингу циркуляції вод Світового океану. Інформацію про рівень морів і топографію поверхні океану використовують також для відновлення картини рельєфу дна океану. Регулярні спостереження з супутника Topex/Poseidon дали змогу, зокрема, простежити за висотою поверхні Аральського моря, яке за останні 50 років зменшилось в об'ємі майже втричі (рис. 5.105). Падіння рівня Великого Аралу відзначають протягом всього періоду спостережень.

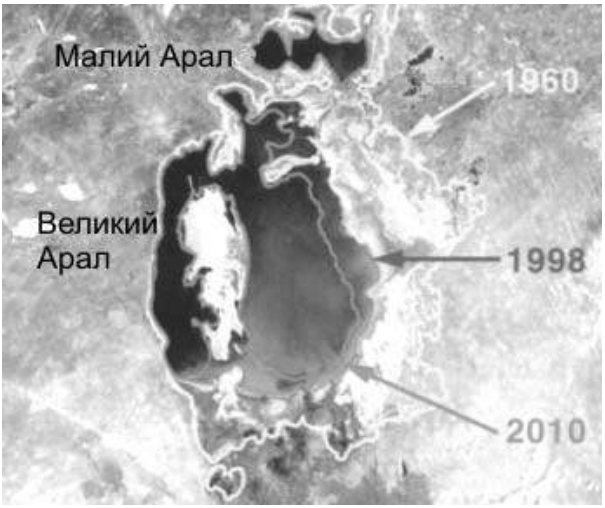



Рис. 5.105. Зміни рівня Аральського моря за даними Topex/Poseidon.

*Фронти, фронтальні зони і океанічні вихори.* Фронти і фронтальні зони належать до найцікавіших явищ в океані. Фронти – це аномальні зони у товщі водної поверхні океану, пов'язані з максимальними градієнтами температури, солоності, щільності, швидкості тощо.

У фронтальних зонах протікають інтенсивні динамічні процеси, особливо там, де трапляються водні маси з найбільшими відмінностями фізико-хімічних властивостей, наприклад, у субполярних і полярних фронтальних зонах, тоді як екваторіальні і тропічні фронтальні зони менш динамічні, оскільки відмінності фізико-хімічних властивостей в них незначні. Особливостями фронтальних зон є їхня складна структура, висока динамічність і просторово-часова мінливість. Складність структури засвідчує фронтальна зона Гольфстріму, яка охоплює безліч окремих фронтальних границь. Також фронтальні зони є областями підвищеної біопродуктивності, що надзвичайно важливо в промисловому значенні.

Фронти на поверхні океану мають, здебільшого, вигляд протяжних смуг з максимальними горизонтальними градієнтами фізико-хімічних характеристик і екстремумами характеристик стану морської поверхні (рис. 5.106). Візуально фронти спостері-

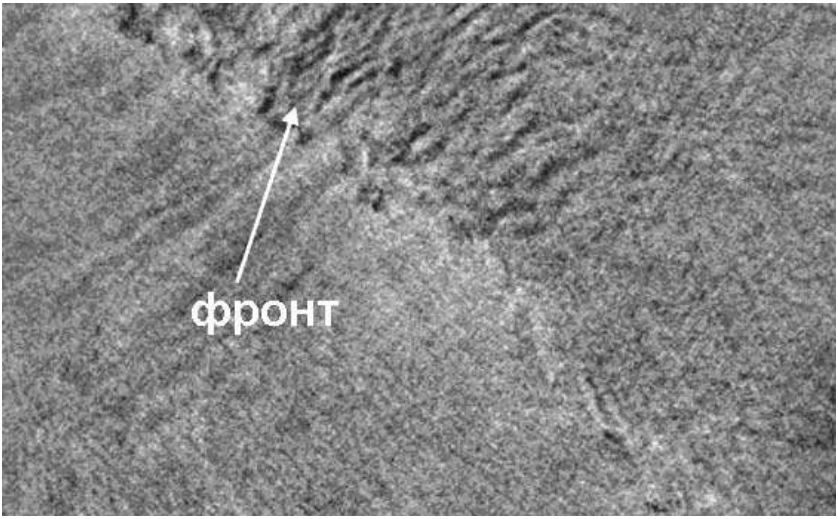
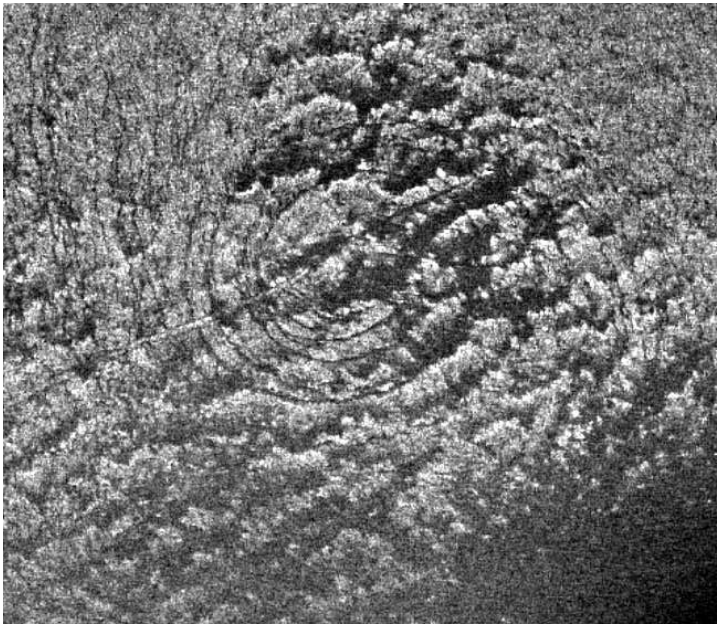



Рис. 5.106. Фронтальна зона в Атлантичному океані на радіолокаційному знімку з російського супутника "Алмаз". (Дешифрувальною ознакою є різна текстура зображення морського хвилювання з обох сторін від фронту).

гають як відносно вузькі смуги на морській поверхні, в яких скупчуються поверхнево-активні речовини, водорості, плаваюче сміття тощо. Фронти виявляють також за різкою зміною характеристик поверхневого хвилювання, яке розсіює денне світло.

У Світовому океані спостерігають велику кількість *вихорів і вихрових рухів*. Зазвичай, виділяють фронтальні вихори, вихори відкритого океану, топографічні вихори, пов'язані з обтіканням підводних перешкод водними масами і синоптичні вихори, спричинені атмосферними процесами (наприклад, тайфунами). Розрізняють циклонні і антициклонні вихори (за типом обертання), великомасштабні, проміжні і мезомасштабні (за просторовими масштабами), а також квазіпостійні, довгоживучі і короткочасні (за часом існування) (рис. 5.107).

Супутникова інформація дає унікальну змогу побачити картину вихрових рухів в океані. Знімання з космосу, виконане у видимому, тепловому інфрачервоному і радіодіапазонах, показали, що крім великомасштабних квазістаціонарних вихорів, які довго існують, в океані простежують різноманітні різномасштабні вих-



*а*

*б*

Рис. 5.107. Океанічний вихор у затоці між островами Багамського архіпелагу (*а*) і грибовидні вихрові структури у Каспійському морі (*б*) на радіолокаційних знімках зі супутника ERS-1.

рові утворення з часом існування від декількох діб до декількох тижнів.

За допомогою даних ДЗЗ вдалося отримати уявлення про просторово-часові масштаби, механізми формування, еволюції і руйнування вихрових структур. Серед них варто виокремити: фронтальні вихори (їх ще називають ринги) відкритого океану, які виникають через меандрування великомасштабних течій (таких, як Гольфстрім і Куросіо) під час відриву меандрів; одиночні вихори відкритого океану; ланцюги здвигових вихорів; вихори за островами; вихори, що виникають через неоднорідності берегової лінії (у бухтах, затоках, за мисами); вихори в місці зустрічі або розходження течій; грибоподібні течії; конвективні вихори та ін.

Космічні зображення дають змогу отримати інформацію про типи нестаціонарних вихрових рухів в океані, про їхні горизонтальні масштаби, час існування, напрям обертання (циклонний або антициклонний вихор) і напрям переміщення в просторі. Вихори виявляються на морській поверхні, модулюючи дрібномасштабне вітрове хвилювання в зонах зіткнення вихрових течій біогенними плівками, в полях температури, льоду, що дрейфує, зважених частинок або хлорофілу. Це дає змогу вивчати їх, використовуючи принцип множинності, за допомогою серії різних давачів на одному супутнику, виконуючи квазісинхронні знімання у видимому, тепловому інфрачервоному і радіодіапазонах.

*Апвелінг.* В океанології апвелінгом називають явище підйому глибинних вод (холодніших, солоніших і насичених біогенними елементами) на поверхню. Розрізняють два типи апвелінгу: прибережний і відкритого океану. Прибережний апвелінг виникає унаслідок зганяння поверхневих вод вітром і підйому на їхнє місце глибинних вод. Найбільш відомий Перуанський, Канарський, Каліфорнійський, Сомалі, Бенгальський апвелінги. У відкритому океані апвелінг утворюється через дивергенцію (розтікання) поверхневих течій як компенсаційний підйом глибинних вод до поверхні; добре відома дивергенція в районі екватора і біля узбережжя Антарктиди. Існування зон постійного апвелінгу має велике значення для рибного промислу.

З космосу апвелінг може бути видимий на знімках у всіх трьох діапазонах ЕМХ: у видимому – в полі хлорофілу, в тепловому інфрачервоному – в полі температур поверхні океану, а під час

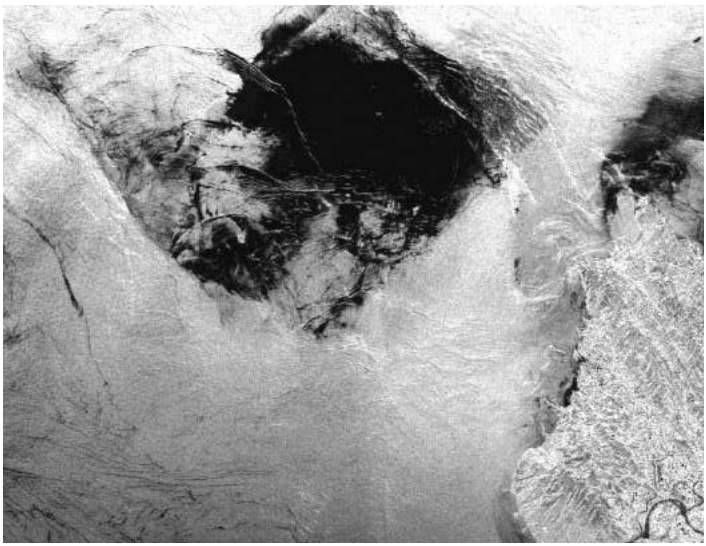
локації в радіодіапазоні – за виположуванням короткохвильових компонент вітрового хвилювання. Райони виходу на поверхню глибинних вод мають гладку поверхню і виглядають на космічних радіолокаційних знімках як обширні темні області з різкими межами (рис. 5.108). Це пояснюють декількома причинами. По-перше, зменшення шорсткості морської поверхні може бути пов'язане з формуванням над холодною водою стійкої стратифікації атмосфери (швидкість вітру менша від порогової, і резонансні гравітаційно-капілярні хвилі не збуджуються). По-друге, поверхня холодної води в зоні апвелінга може бути покрита плівками поверхнево-активних речовин, які утворилися завдяки активній життєдіяльності планктону. Вода в зоні апвелінга значно більше насичена біогенними речовинами, які виносяться з глибини, що сприяє розвитку планктонних організмів. Органічні речовини (жирні спирти, кислоти і т.п.), які виділяються при цьому, скупчуються на поверхні, збираються в плівки і гасять дрібномасштабне поверхневе хвилювання.

*Колір* надають океану як біологічні істоти, так і органічні та мінеральні продукти. Різним є колір у каламутної і чистої води.

*Морський фітопланктон* представляє значний інтерес, зважаючи на його розповсюдження і велике значення в біологічній продуктивності Світового океану. Фітопланктон – це одноклітинні мікроскопічні рослинні організми розміром від 1 мкм до 1 мм – представники багатьох груп водоростей. Як початкова ланка харчового ланцюга, фітопланктон забезпечує їжу зоопланктону та іншим організмам харчових ланцюгів.

Значне скупчення в поверхневому шарі найдрібніших морських організмів викликає зміну його забарвлення, яку називають цвітінням морів. Часто простежують рясне цвітіння води завдяки розвитку фітопланктону, коли популяція досягає 108–1 010 клітин на 1 *л*. Воно буває червоного, коричневого, жовтого, молочно-білого та інших кольорів у вигляді обширних плям або смуг великої протяжності, часто добре видимих з космосу (рис. 5.109).

Застосування дистанційного зондування для оцінки концентрації фітопланктону у верхньому шарі океану і його первинної продуктивності ґрунтується на оптичних властивостях пігменту фітопланктону. Відомо, що пігмент фітопланктону поглинає енергію переважно в блакитній і червоній зонах спектра і відбиває в



а б

Рис. 5.108. Апвелінг:
*а* – у Східно-Китайському морі (радіолокаційний знімок зі супутника ERS-1);
*б* – біля берегів США (інфрачервоний космознімок).

Рис. 5.109. Смуга концентрації фітопланктону біля берегів Ірландії (багатозональний космознімок).

зеленій. Отже, існує певне співвідношення між спектральним віддзеркаленням поверхневого шару океану і вмістом у нього пігментів фітопланктону. Співвідношення яскравості в блакитній і зеленій спектральних зонах визначає колір води ("колірний індекс").

За даними ДЗЗ виявили головні риси розподілу фітопланктону в Світовому океані: концентрацію в холодніших прибережних шельфових водах (жовто-оранжево-червоні кольори) і в районах підйому холодних глибинних вод (апвелінгів) за відносної бідності вод відкритого океану і наявності "океанічних пустель" у тропічних та субтропічних широтах (синьо-фіолетові кольори).

Сьогодні спостереження фітопланктону (точніше хлорофілу "а") і його просторового розподілу з космосу виконують за допомогою спектрорадіометрів MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) на супутнику Envisat та MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) – на супутниках Terra і Aqua. На МКС за участю російських й американських екіпажів проводять експеримент "Діатомея", який має на меті отримання даних, що характеризують стійкість географічного положення і форми меж біопродуктивних районів Світового океану, які спостерігають з космосу.

Головним споживачем даних про колір океану є рибальство. Цю інформацію спільно з даними про температуру поверхневого шару води використовують для скерування рибалок і рибальських суден в акваторії, де може бути виявлена риба. Це ґрунтується на принципі ланцюга живлення – достатня кількість фітопланктону приводить до відповідної кількості зоопланктону, який харчується ним; це позначається на кількості риби, яка харчується зоопланктоном. Так наявність значної кількості фітопланктону, яку вимірюють через зміни в кольорі океану, виступає індикатором потенційної наявності риби.

Окрім біологічних запасів, за кольором вивчають *мутність вод*. На знімках морського побережжя поблизу дельт великих рік добре видно продовження річкових потоків, які містять води підвищеної каламутності, прибережні смуги замутненої води в зоні хвилевого перемішування донних відкладів. За знімками неважко визначити ширину цієї зони.

*Нафтове забруднення* морської поверхні виявляється на космічних знімках завдяки тому, що нафтова плівка стримує хвилювання і викликає появу сліків. Сліки (від англ slick – гладкий, блискучий) – це гладкі дзеркальні смуги або плями на поверхні океанів, морів чи внутрішніх водойм, які мають на радіолокаційних зображеннях чорний колір (рис. 5.110).

Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям нафта може існувати в океані тривалий час у вигляді плівок, в емульгованому вигляді або у вигляді агрегатів. На розповсюдження плівок поверхнею моря впливають два процеси: перенесення (дрейф) під дією вітру, хвиль і течій та мимовільне розтікання по поверхні. У разі сильного вітру пляма руйнується, і в шарі вітрового перемішу-

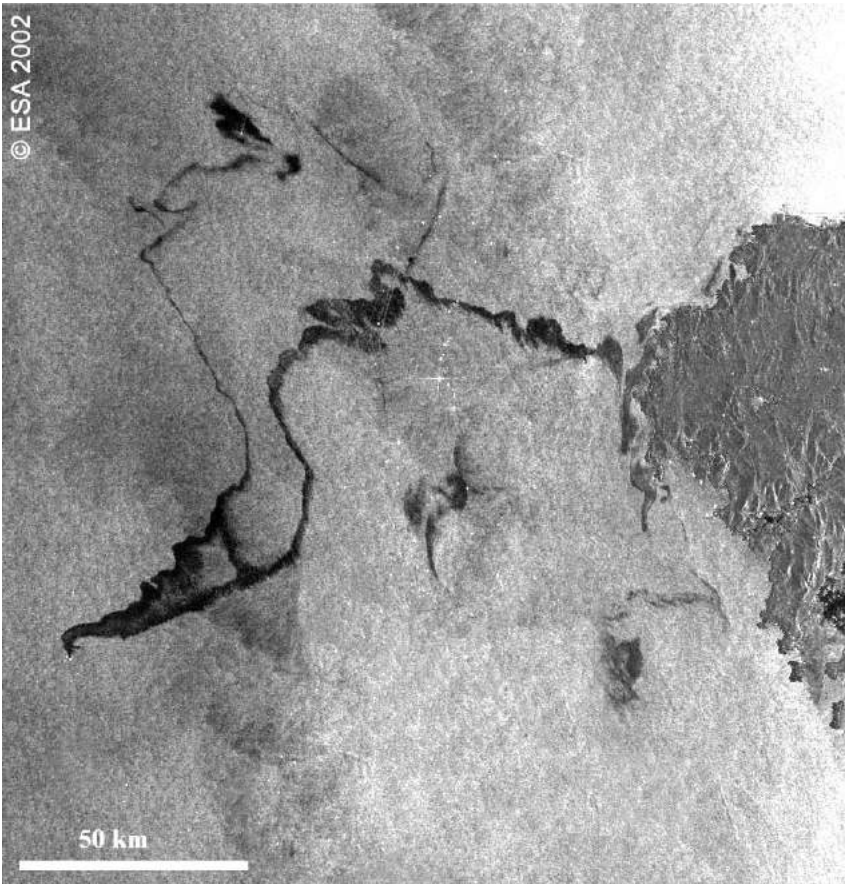



Рис. 5.110. Аварія танкера і нафтова плівка, що тягнеться чорною смугою за судном (радіолокаційний космознімок). Світлими крапками відобразилися кораблі в акваторії моря.

вання виникає нафтова емульсія (причому водна емульсія з часом осідає на дно). На відміну від синтетичних речовин, нафта ніколи не розтікається до мономолекулярних шарів, а її плівки мають велику товщину, оскільки вона являє собою складну суміш.

Плівки антропогенного походження на поверхні моря утворюють не тільки нафта і продукти її переробки, а й різні технічні і побутові масла, жирні кислоти і спирти, синтетичні поверхнево-активні речовини, що містяться в побутових, промислових

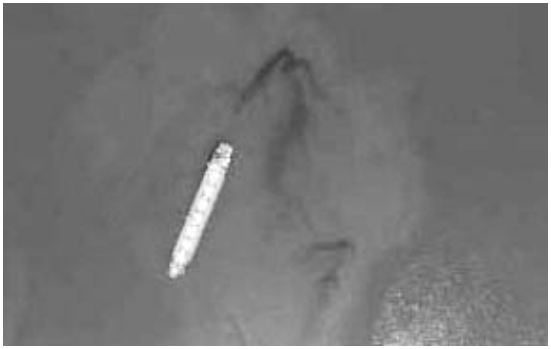


Рис. 5.111. Скид баластних вод судном
у Південно-Китайському морі.

та каналізаційних стоках. Різницю у зображенні мають також скинуті баластні води з торгових суден під час заходу в порти (рис. 5.111).

Для виявлення і дослідження плівкових забруднень на акваторіях застосовують пасивні й активні давачі в ультрафіолетовому, видимому, інфрачервоному і радіодіапазонах.

*Визначення глибин шельфу і рельєфу дна океанів.* Підводний рельєф з космосу можна спостерігати і фіксувати на знімках у видимому діапазоні в разі високої прозорості води і штильової погоди. Водна товща ослабляє яскравість, контраст і чіткість спостережуваних підводних об’єктів. Інтенсивність проникаючого у воду сонячного випромінювання падає, а спектральний склад змінюється. Інфрачервоне випромінювання повністю поглинається поверхневими шарами води. Для прозорих вод, коли майже немає суспензій і фітопланктону, червоні промені проникають на глибину до 10 м, жовті – 20 м, і лише синьо-блакитні промені досягають глибини 50 м. Інтенсивність світла тут зменшується в 100 разів. На великих глибинах дно майже не освітлене сонячним світлом. Отже, зона, що проглядається, обмежена невеликими глибинами до 20 м у водах середньої прозорості (наприклад, у Чорному, Каспійському морях) і до 40 м у прозорих водах, наприклад, у Карібському морі. Тому космічні знімки забезпечують вивчення рельєфу дна лише в зоні мілководого шельфу, найбільш оптимальним тут є багатозональне знімання.

На космічних знімках у видимому діапазоні добре відображається будова дна в мілководій зоні, виразно виділяються мілини і банки, лагуни усередині атолів; видно форми донного рельєфу: вздовжберегові вали, бари, гряди, приливні дельти, русла палеорічок, коралові рифи та ін. Найкраще видимий підводний рельєф у тих областях, для яких характерна різка зміна глибин та прозора вода (рис. 5.112). Наприклад, добре розділені мілководдя та глибини в районі Великих і Малих Антільських островів у Карібському морі, мілини Багамської банки та глибоководної впадини поблизу неї. У багатьох випадках на знімках видно деталі рельєфу крутих схилів впадин.

Цінну інформацію про рельєф мілководдя отримують за радіолокаційними зніманнями. На радіолокаційних знімках підводний рельєф найкраще простежується у припливних морях, необхідною умовою його спостереження є сильна припливна течія і вітрове хвилювання на поверхні. Космічний радіолокатор дає унікальну змогу дослідження донного рельєфу мілководих ділянок шельфу з глибинами 5–40 м. Іншими засобами дистанційного зондування таку інформацію в умовах підвищеної каламутності припливних вод отримати, по суті, неможливо.

Сучасні дослідження використовують альтиметричні дані зі супутників Seasat, ERS, які забезпечують визначення топографії поверхні з точністю 5–10 см. За картами рельєфу морської поверхні відновлені головні риси донного рельєфу і складена карта рельєфу дна Світового океану.

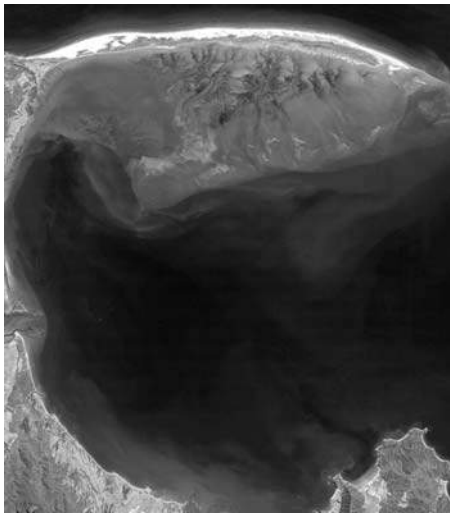
*Вивчення морського хвилювання*. Перше з явищ в океані, на яке натрапляє будь-який спостерігач, – це хвилі на воді. Переважаючими на поверхні океанів і морів є вітрові і припливно-відпливні хвилі.

Викликаючи шорсткість морської поверхні, хвилі відображаються на радіолокаційних знімках. Радіоальтиметри дають змогу визначати висоту хвиль, а НВЧ-радіометри – силу хвилювання. На радіолокаційних знімках виділяють різні системи хвиль, що розповсюджуються у різних напрямах, спостерігають рефракцію хвиль на мілководдя і інтерференцію за перешкодами, іноді окремі плями і смуги піни, прибійну зону та ін. Методами спектрального аналізу за радіолокаційними зображеннями визначають важливі параметри морського хвилювання: довжину хвилі і напрям розповсюдження, а також кількість систем хвилювання.

*а*

*б*

*в*



*г*

Рис. 5.112. Глибинні та мілководні ділянки, видимі з космосу:
*а* – Венеціанська затока, *б* – атол з мілководною лагуною,
*в* – підводний рельєф Багамської банки, *г* – коса та мілководдя
на одному з Антильських островів.

На знімках середнього розрізнення хвилювання виявляють за різною структурою зображення поверхневих шарів океану. Вони пов'язані з особливостями відбиття сонячного проміння від різних типів морських хвиль. На знімках великої роздільної здатності морське хвилювання можна спостерігати безпосередньо, вловлюючи відображення океанічних бриж (рис. 5.113). За цими знімками аналізують можливість застосування оптичного перетворення Фур'є для вимірювання довжин хвиль і їхньої зміни у разі набігання на мілководдя. Цим методом розраховують елементи хвиль океанічних брижів.

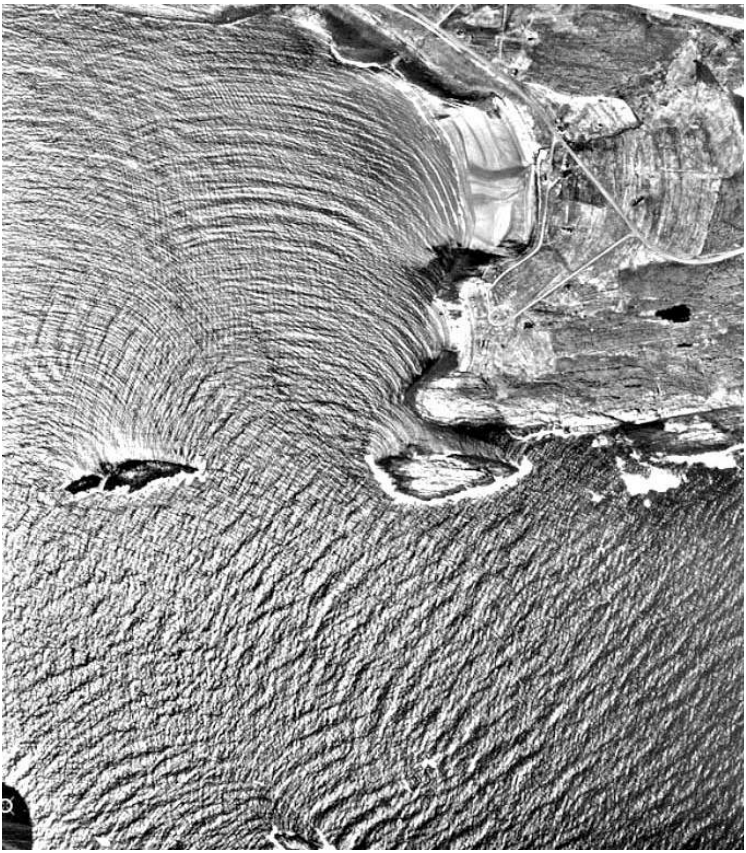


Рис. 5.113. Океанські хвилі в затоці.
Добре видно ефекти рефракції, інтерференції й обвалення хвиль.

Серед хвиль, які існують в океані, найбільш небезпечними вважають “хвилі-вбивці” і хвилі цунамі, які представляють не тільки пізнавальний інтерес.

Термін “*хвиля-вбивця*” та його аналоги з інших мов (англ. “rogue wave” – хвиля-розбійник, “freak-wave” – хвиля-дурень, відморозок; фр. “onde scelerate” – хвиля-злочинниця, “galejade” – поганий жарт, розіграш) дають хороше уявлення про суттєві риси цього природного явища, передають відчуття жаху і приреченості під час зустрічі з такою хвилею в океані. Хвилі-вбивці визначають як хвилі, висота яких більше, ніж у два рази перевищує наявну висоту хвиль (середню висоту однієї третини найвищих хвиль). Наведене визначення стосується швидше хвиль аномально великої амплітуди (порівняно із середньою) (рис. 5.114). Ці хвилі можуть з’являтися під час малих вітрів і порівняно слабкого хвилюваня, що приводить до думки про те, що саме явище “хвиль-вбивць”

Рис. 5.114. Гігантська хвиля (заввишки близько 20 м) у протоці Дрейка; фотографування з борту корабля “Академік Іоффе”. Фото О.В. Грігорьєва.

пов'язане з особливостями динаміки морських хвиль і їхньою трансформацією під час розповсюдження в океані.

Хвилі-вбивці дешифрують на радіолокаційних знімках за аномально високою яскравістю зображення, за яким за особливих методів обробки може бути відновлений профіль хвилі.

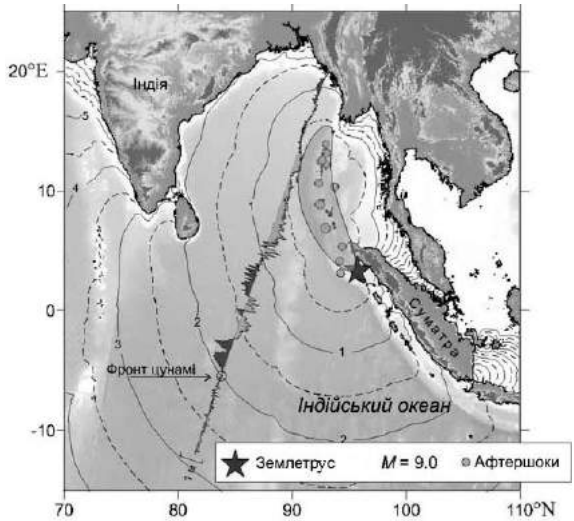
*Цунамі* – це особливий клас поверхневих гравітаційних хвиль, які розповсюджуються в океані на великі відстані від місця свого виникнення. Дослівний переклад слова "цунамі" з японського означає "велика хвиля в гавані". Отже, небезпека загрожує не суднам у відкритому океані, а прибережним районам суші, передусім портовим спорудам, прибережним населеним пунктам і промисловим об'єктам, а також суднам біля причалу. У глибокому океані висота хвиль цунамі не перевищує десятка сантиметрів, на шельфі хвилі сповільнюються, коротшають, їхня висота збільшується, а в прибійній зоні може досягати десятків метрів. Висоту цунамі біля берега сучасна наука прогнозує вельми приблизно.

Серед причин утворення цунамі в океані виділяють: підводні землетруси (понад 82% всіх випадків), виверження вулканів, підводні і надводні обвали, різкі флуктуації атмосферного тиску, падіння метеорита або астероїда в океан, технічну діяльність людини (головно, під час розвідки і видобутку нафти на шельфі і підводних атомних вибухах), що викликає так звані техногенні землетруси і, відповідно, техногенне цунамі.

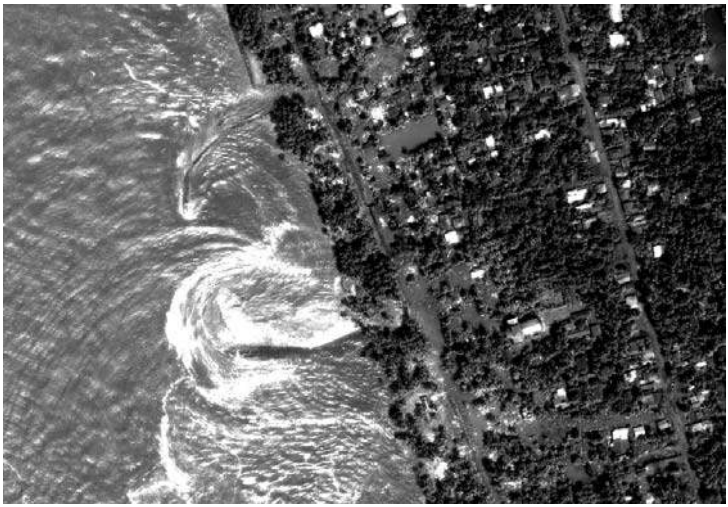
Традиційні методи попередження цунамі ґрунтуються на сейсмічній інформації, яку отримують відразу після землетрусу, і на розрахунках часу приходу хвилі і її висоти.

Космічні системи дистанційного зондування Землі в радіодіапазоні забезпечують глобальний моніторинг поверхні океану незалежно від стану атмосфери і часу доби. Вперше параметри сейсмічних хвиль були заміряні радіометром із супутника Topex/Poseidon. Проте у випадку з цунамі це надзвичайно складно, оскільки такі процеси, як гравітаційні аномалії рівня океану, геострофічні течії, припливи, штормові нагони води, створюють так званий океанічний шум. Спеціальними методами цей шум повинен бути усунений, а корисний сигнал відфільтрований.

З середини 70-х років XX століття і до сьогодні ефективними залишаються системи спостережень у видимому діапазоні високої роздільної здатності з літаків та космічних апаратів (рис. 5.115).




*а*



*б*

Рис. 5.115. Цунамі в Індійському океані:
*а* – виявлене і нанесене на карту за допомогою альтиметра на супутнику Jason-1 через дві години після індонезійського землетрусу 26 грудня 2004 р. (нанесені ізолінії часу добігання хвиль цунамі в годинах), *б* – ділянка побережжя о. Суматра, Індонезія, на яку накочується хвиля цунамі (знімок супутника Quickbird).

*Вивчення надводного вітру.* Швидкість і напрям вітру біля поверхні води може бути заміряна тільки над океаном СВЧ-радіометрами і скатерометрами. Радіолокаційна система скатерометра посилає мікрохвильові імпульси і приймає відбитий від поверхні сигнал. Інтенсивність поверненого сигналу залежить від шорсткості поверхні: для морської поверхні шорсткість, викликана вітровим хвилюванням, тим сильніше, чим більше швидкість вітру. Дослідження забезпечують щоденні дані для складання глобальних карт вітрів.

Інформація про швидкості і напрям вітру має важливе значення під час вивчення взаємодії океану й атмосфери, циркуляції океанічних вод та їхнього впливу на погоду і клімат Землі. Ці ж дані необхідні і під час вивчення незвичайних явищ в океані, таких як Ель-ніньо.

Дані про швидкості і напрям приповерхневого вітру необхідні для уточнення прогнозів погоди, виявлення ураганів, що зароджуються, тропічних циклонів, дослідження шляхів їхнього проходження, розрахунку інтенсивності штормів на морі. Їх використовують у навігації для прокладення курсів суден і під час планування робіт на нафтопромислах в шельфовій зоні. У всіх випадках інформація про вітри, щодня отримувана з космосу, виявляється значно дешевшою й оперативнішою, ніж отримувана наземними методами.

*Дослідження льодових полів та поширення айсбергів.* Морські льоди утворюються у високих широтах і є значною проблемою для судноплавства. Знімки дають змогу кількісно і якісно визначити стан льодового покриву морів та океанів, його зміни, причому це можливо робити і в умовах полярної ночі, використовуючи інфрачервону апаратуру.

Космічне знімання особливо ефективне для дослідження сезонних змін стану льодового покриву. При цьому не завжди отримують остаточні карти типів льоду або навіть карти в ізолініях яскравості, а іноді обмежуються первинними картами мінімальної яскравості в цифрах.

Для полегшення процесу дешифрування морських льодів, окрім програмної обробки, використовують дешифрування кольорових рівноступеневих за масштабами знімків, на яких добре розрізняються материковий лід, морський лід паковий і плавучий.

На фотографічних знімках за фототоном можна визначити товщину льоду. Зображення льоду товщиною 5 см має майже чорний колір, як і вода, 5–15 см – сірий, 5–30 – світло-сірий, 30–70 – майже білий, 70 см і більше – яскраво білий фототон. За фототоном визначають також вік льоду, ступінь його щільності, структуру льодових полів, вологість льодів, спрямованість і швидкість дрейфу льодових полів.

Цікаві можливості вивчення морських льодів відкриваються під час використання мікрохвильової апаратури. На зображеннях, отриманих шляхом реєстрації мікрохвильового випромінювання, тонкий молодий лід добре відрізняється від багаторічного. Цей тип досліджень вперше використаний під час спостережень зі супутника "Німбус-5".

Сучасні супутники дають змогу отримувати зображення високого і середнього розрізнення у видимому, тепловому інфрачервоному і радіо діапазонах, за якими можуть бути оперативно складені достатньо точні карти льодового покриву для більшості полярних районів. Нині для оперативних спостережень за льодовим покривом арктичного моря застосовують спектрорадіометри високої і середньої роздільної здатності (MODIS на супутниках Terra і Aqua), а також радіолокатори зі синтезованою апертурою SAR на супутниках ERS-2, Envisat і Radarsat і мікрохвильові радіометри (SSM/I на супутнику DMSP і AMRS-E на супутнику Aqua). За інформацією зі супутників оцінюють стан льодового покриву і можливості навігації у приполярних областях, а також просування айсбергів в арктичних й антарктичних водах.

За даними супутників створюють анімаційні фільми сезонних змін розповсюдження морських льодів, а за різночасовими зображеннями – карти "індексу руху льоду".

*Вивчення морських та океанічних берегів.* Під час візуальних спостережень з космосу і на космічних знімках дешифрують будову ділянок шельфу і континентального схилу: видно пологі вирівняні ступені, які поступово занурюються на глибину, обмежені лінійними уступами. Ступінчастий рельєф схилу порізаний широкими підводними долинами, утвореними мулистими турбулентними потоками, що рухалися подібно до рік у глибинах океану. За космічними знімками в зонах континентального шельфу прогнозують місцезнаходження різних типів корисних копалини (солей, розсипів, металоносних конкрецій).

Береги, розташовані вздовж активних геосинклінальних зон, наприклад, західного узбережжя Північної і Південної Америки, східних берегів Азії, так само як і берегові лінії внутріконтинентальних морів типу Середземного і Чорного, характеризуються слідами інтенсивних тектонічних рухів – зсувів, насувів, зрушень, а іноді і розсувів. Уздовж берегів простягаються складно влаштовані гірські хребти, які прорізаються лінійними вузькими долинами; іноді простежується мозаїчний блоковий рельєф. Поблизу побережжя нерідко трапляються порізані неправильної форми вулканічні острови; навіть хмарність над шельфовими зонами часто шикується в складно орієнтовані ламані лінії, аномалії теплового потоку, що йде з глибин.

Значна частина суходолу має низинні акумулятивні береги. Для таких берегів характерний більш темний фототон зобра-

Рис. 5.116. Абразійний берег у районі Севастополя.
Темною смугою тіні зображений зсувний кліф, у підніжжі якого делювіальні відклади формують горбкуватий рельєф і пляж (смуга білуватого фототону). За зернистою текстурою видно напрям поширення хвиль – під кутом до берега.

ження. Часто трапляються широкі дельти (дельта Нілу, Лєни, Муррея) або затоплені гирла рік у вигляді естуаріїв, лиманів (губа Єнісею, лимани Дністра, Дніпра, Бугу та ін.). На знімках великої роздільної здатності можна розгледіти вузькі смуги білуватого фототону, які інтерпретують як пляжі (рис. 5.116). За знімками можливе вивчення динаміки накопичення та розмиву надводних і підводних дельт, зміни контурів берегових ліній (детальніше див. п. 5.4.3).

Отже, океанологічні космічні дослідження є досить обширними. Знімки дають змогу вивчати розподіл приповерхневих течій і гідросферних фронтів, зв'язок між циркуляцією хмарних і водяних мас, закономірності будови і динаміку переміщення льодового покриву в арктичних і антарктичних областях, виявляти і картувати нафтові плівки та інші зони забруднення океанічних вод, спостерігати за переміщенням рибних косяків і планктону, за рухом зважених твердих частинок в океанічних і морських водах. Одночасно космічні знімки дають змогу отримати інформацію про берегові лінії морських й океанічних басейнів і навіть про будову дна в межах шельфових зон морського та океанічного побережжя.

## 5.9. Дистанційні дослідження сніжно-льодових явищ

В групу названих явищ пропонуємо об'єднати усі наземні формації та процеси, що пов'язані з льодом і снігом, з їхніми фазовими трансформаціями та географічними проявами. Це дуже велика група географічних об'єктів, що можуть існувати в умовах з температурою, нижчою від 0°С і опадами в твердому стані, які зберігаються постійно чи виникають періодично і тривалий час. Вони знаходяться в арктичному і субарктичному поясах, а також в гірських областях вище снігової межі, піддавалися впливу минулих льодових епох та зазнають впливу сучасних льодовиків. Об'єктами досліджень є також сніговий покрив, який вкриває земну поверхню у зимовий сезон або постійно існує в арктичних областях.

Під час вивчення сніжно-льодових (по-іншому, нівально-гляціальних) явищ вирішують комплекс природознавчих проблем гірських та рівнинних територій, виявлення регіональних, зональних, висотно-поясних закономірностей розвитку процесів, аналіз їхніх часових станів, просторової та часової динаміки, прогнозування їхнього розвитку, впливу на господарську діяльність людини. Використання дистанційних методів при дослідженні цих явищ та процесів сприяло значному поступу у вивченості, навіть новим відкриттям, створенню та уточненню спеціальних тематичних карт (льодовиків, нівальних поясів, поширення термокарсту).

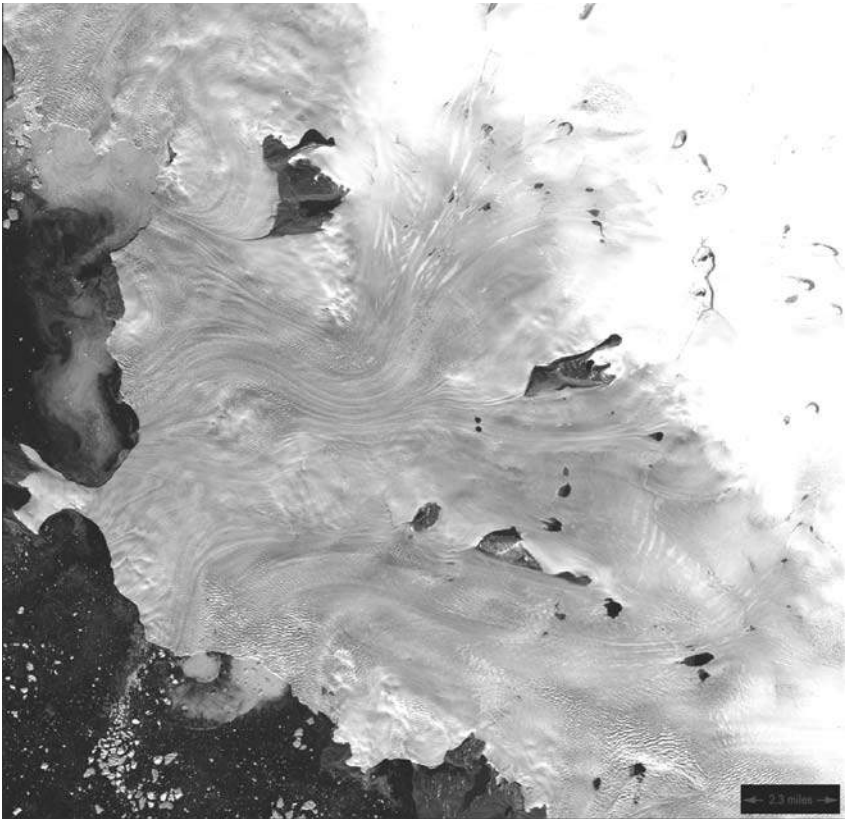



Рис. 5.117. Льодовики на узбережжі Гренландії.
Сірим фототоном зображений лід, насичений водою,
сухий лід – яскраво білим, вода – темним фототоном.

Вивчення сучасних сніжно-льодових проявів дає інформацію для дешифрування регіонів давнього зледеніння, можливості їхнього поділу на зони сніго- та льодонагромадження, транзиту та акумуляції.

Крива спектральної яскравості снігових та льодових поверхонь має таку специфіку: у світловому діапазоні це стабільна і найвища з усіх природних об'єктів яскравість. Під час зростання насичення снігу талою водою спостерігають зниження його яскравості (рис. 5.117). У близькому інфрачервоному діапазоні яскравість снігу та льоду з наростанням довжини ЕМХ починає поступово і пришвидшено знижуватися. У середній частині інфрачервоного діапазону їхня яскравість мало відрізняється від інших природних поверхонь і тому їхнє дешифрування в цій частині спектра ЕМХ може бути проблематичним. У далекій частині діапазону інфрачервоних хвиль яскравість зазначених об'єктів продовжує зменшуватись і стає меншою не тільки від скальних порід чи ґрунтів, а й від рослинних об'єктів, якщо вони там трапляються. Для снігових та льодових поверхонь характерними є також дві смуги поглинання ЕМХ, що припадає на довжини 1,45 та 1,95 мкм, які властиві для всіх інших об'єктів, що мають в собі воду (рослинність, ґрунти, гірські породи).

Коефіцієнти яскравості мерзлих об'єктів можуть сильно змінюватися, що залежить від багатьох чинників, зокрема від поверхневої забрудненості, структури, перекристалізації.

Для визначення територій покритих снігом та льодом в планетарному масштабі використовують матеріали знімання з апаратури, виведеної на полярні (з висотами 900–1500 км) та геостаціонарні орбіти (біля 36 000 км). Крім зазначених використовують матеріали знімань з нижчих орбіт як калібрувальних. Найбільш вживаною для цієї мети є телевізійні кадрові та сканерні апарати з високою та дуже високою роздільною здатністю.

Інтерпретація даних може бути не тільки якісна (дешифрування зображень на наявність чи відсутність покривів), а й кількісна, коли отримують показники товщини покривів, температуру діяльної поверхні, відсоток відсутності покривів.

Аналіз зображень показав, що розподіл, а особливо перерозподіл снігового покривів значною мірою визначається параметрами вітру. На гірських схилах важливе значення в форму-

ванні та руйнації снігового покриву має орієнтація та крутість схилів, особливо експозиція досонячна чи відсонячна. Особливо зазначені чинники проявляються там, де товщина снігу менша від 40–30 см.

*Потужність снігового покриву* дешифрують *на знімках видимого діапазону* за показникам яскравості, особливо, якщо вибрати певні градації товщини (наприклад 0–8, 8–30, більше 30 см.) Досить легко за яскравістю можна дешифрувати крижані поля та айсберги (плаваючі льодяні гори), що яскраво вирізняються на фоні сірих і темно-сірих до чорного фототонах водяних поверхонь.

На матеріалах знімання *в мікрохвильовому діапазоні* дешифрування *льодових покривів* та льодових полів на водах можливе завдяки великій різниці у радіояскравості поміж сушею та океаном, які досягають 160°К, поміж водою океану і льодами та поміж льодом пізнього віку, бо радіояскравісна температура однорічного льоду дорівнює 240°К, а багаторічного – вже 220°К. Завдяки таким вимірюванням виявлено, що морський лід (не айсберги материкового походження) здебільшого однорічний.

Паралельне використання знімків мікрохвильового та інфрачервоного діапазонів дало змогу побудови карт випромінювальної здатності льодового покриву. Аналіз таких карт, складених для Ґренландії та Антарктиди, показав надійність цього методу також і для *картографування віку льоду*, виявлення сезонних змін, пов'язаних з таненням та утворенням льоду, відстежуванням щільності плаваючого льоду, формуванням поля пакового[20] льоду, динамікою льодових процесів, формуванням та руйнуванням прибережної льодової облямівки.

Важливим параметром, що характеризує сніговий покрив, є його *водний еквівалент*, який особливо потрібний для розрахунків стоку під час сніготанення та прогнозування стоку. Дослідження виявили, що водний еквівалент (запаси води в сніговому покриві) добре корелює з випромінювальною здатністю снігового покриву в мікрохвильовому діапазоні, а саме в каналах 31,4 і 22,2 ГГц, у яких вплив атмосфери на потік випромінювання несуттєвий.

---

[20] Паковий лід – (пак) – сукупність крижин багаторічного льоду, що змерзлися в один суцільний чи розбитий на частини масив. Паковий лід рухається разом з морськими течіями та вітром.

Використання *засобів активної радіолокації* дає змогу отримувати інформацію з більшою роздільною здатністю, ніж під час використання апаратури для пасивної радіолокації. Через те, що крига великої товщини (180 і більше сантиметрів) зумовлює сильніший відбитий сигнал (особливо на частоті 13,3 ГГц), ніж тонкий (18–90 см) лід, є змога впевнено розрізняти льодяні покриви з різною товщиною льоду. Дуже тонкий лід (менше 18 см) можна виявляти за найслабшим відбиттям на частоті 400 МГц. Вода від льоду вирізняється на обох частотах.

Вивчення сніжно-льодових явищ дистанційними методами охоплює дослідження: 1) гірського зледеніння; 2) материкового (покривного) зледеніння; 3) снігового покриву.

***Дослідження гірських льодовиків***

На космічних знімках середніх масштабів добре окреслені границі та площі льодовиків, а на більш детальних знімках розрізняють також деталі їхньої поверхні. За знімками вивчають швидкості руху льодовиків в горах, їхню динаміку, області формування і сходу лавин. З появою дистанційних даних уточнили та оновили границі гірських льодовиків Анд, Гімалаїв, Тибету, Кавказу, Паміру, Алтаю, Тянь-Шаню, точніше визначили їхні площі. З'ясували також нові області зледеніння в горах Алтаю, Забайкалля; виявили розпад Південно-Патагонського льодового поля. За даними дистанційних досліджень склали Атлас сніжно-льодових ресурсів світу.

Під час дешифрування льодовиків вдається досить надійно виділити область живлення льодовиків (снігонагромадження та фірноформування), транзитну (глетчер) та область танення льодовиків. Рухомі льодовики завжди виходять нижче від своєї зони живлення і тому разом з територією снігонагромадження мають булавоподібну чи букетоподібну форму (рис. 5.118).

Дешифрувальними ознаками гірсько-долинних льодовиків є їхня "язикоподібна" форма зі звуженим округлим або загостреним, роздвоєним (розчленованим) закінченням. Язик льодовика починається нижче від області живлення, яка складається з одного чи кількох карів, розділених темними карлінгами, через що нагадує форму своєрідного букета (див. рис. 5.3.7). Форма "язика" криволінійна, успадковує вигини долини, по якій сповзає. Фототон контуру льодовика світлий, білий, але темніє від області живлення до закінчення "язика", де відбувається його танення. У

Рис. 5.118. В горах помірного поясу льодовикові "язики" опускаються набагато нижче від рівня нівального (білі плями снігів) поясу. Кінці льодовиків під час танення роз'єднуються (в правій половині знімка;темні смуги вздовж льодовиків – серединні морени.; при крутому повороті трогових долин льодовики вимушені зламуватися, а серединні морени набувають хвилястого вигляду внизу (зліва).

разі формування льодовика в кількох карах льодові язики з кожного кару можуть сходитися в одну долину та в один льодовик, і тоді на поверхні цього об'єднаного льодовика видні темні смужки серединних морен (рис. 5.119). Нижні кінці таких льодовиків у поясі їхнього танення знову можуть розділятися, і тоді єдиний глетчер стає роздвоєним чи розділеним на більше частин, кожна з яких дещо відрізняється за довжиною.

Найкращими для дешифрування льодовиків є знімки літнього періоду, виконані в оранжевих та червоних довжинах хвиль, або багатозональні знімки. Найяскравіше зображається сніг на поверхні льоду. Сніг, що лежить на навколишніх схилах в корот-

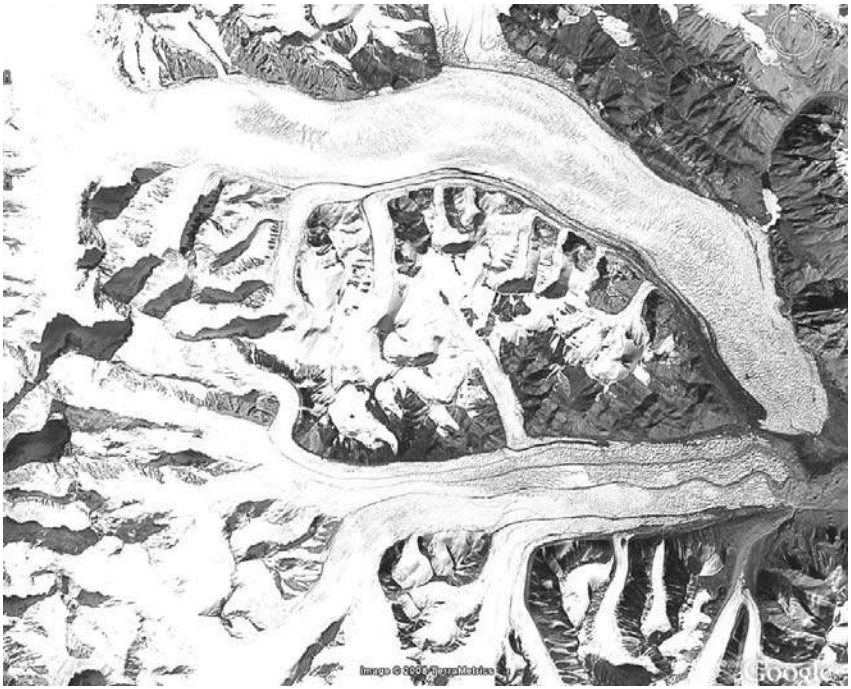



Рис 5.119. Фрагмент льодовикового поясу Паміру.Тіла льодовиків, сформовані в нівальній зоні, опускаються вниз, далеко за її межі. З’єднані з двох і більше окремих льодовиків, що вийшли з різних долин, а зійшлися в одній долині, й надалі розділяються темними смужками серединних морен. Нівальна зона та льодовик, покритий снігом – білі. Льодовик без снігу на поверхні – світло-сірий. Нижня частина льодовика, розтрісканого від перепадів днища та поворотів трогової долини, – губчаста і сіра. Схили гір без снігу – темно-сірі. З боків основної долини виповзають короткі льодовики. По краях нівальної зони лежать сніжники. Озерця талої води перед кінцями язиків льодовиків – майже чорні.

ких хвилях, також має високу яскравість, але в червоних та інфрачервоних хвилях зображається менш яскраво, ніж світлі морени на льодовику. Темні морени та скальні породи в інфрачервоних хвилях мають найменшу яскравість.

Для дешифрування гірсько-долинних льодовиків та областей їхнього живлення використовують знімки середнього та великого масштабів. Сприятливими також є знімки, виконані пізнім літом чи ранньою осінню.

Під час досліджень гірських льодовиків визначають стадії зледеніння – наступання чи відступання, що необхідне під час ймовірного формування загатних ставів та сходженні водно-льодових селів. Враховуючи важку доступність цих об'єктів для піших та авіадосліджень можна виразити оцінку можливостям регулярно слідкувати за льодовиковими, селевими та лавинними явищами в горах як незрівнянно легші та надзвичайно ефективні.

У гірських районах нерідкі випадки стихійних лих, пов'язаних зі сніжно-льодовиковими явищами – лавиною, селями, крижаними обвалами, проривними паводками, переміщеннями пульсуючих льодовиків. Тому важливим є вивчення динаміки льодових язиків, механізму розвитку та особливостей їхнього просування у долинах, а пізніше перейти до з'ясування причин льодових пульсацій, можливостей прогнозування еволюції пульсуючих льодовиків.

Прикладом такого пульсуючого льодовика є льодовик Ведмежий у Західному Памірі (рис. 5.120). Це порівняльно невеликий за памірськими масштабами льодовик – його загальна площа близько 25 км$^2$, а площа пульсуючої ділянки 5 км$^2$. Його переміщення зафіксовані в 1951, 1963, 1973 і 1989 рр. Після переміщення 1963 р. Ведмежий став своєрідною природною лабораторією для вивчення невідомого раніше явища пульсацій. Спостереження на льодовику і прогнозування його переміщень було необхідним і з практичних міркувань – при швидкому наступанні льодовиковий язик перегороджує бічну долину, і там утворюється озеро об'ємом до 20 млн. м$^3$. Його прориви викликають руйнування нижче від льодовика у населеній долині р. Ванч. Так, в 1963 р. паводок зруйнував мости, дорогі, лінії електропередач. Навіть у с. Ванч, що знаходиться на 80 км нижче краю льодовика, він розмив аеродром і поніс літак.

Дослідження *сніжників* показало, що вони характеризуються значним динамізмом об'єму і форми та викликають інтенсивні геоморфологічні процеси. Вони створюють заглиблення на схилах гір (нівальні ніші), які сприяють інтенсивнішому нагромадженню снігу, затіненню від сонця та захищенню від теплого повітря, що продовжує їх ерозійну діяльність і сприяє розширенню та поглибленню ніш. Інтенсивність морозного звітрення біля краю сніжника в 3–5 разів більша, ніж на віддалі від них. Звітрілий матеріал

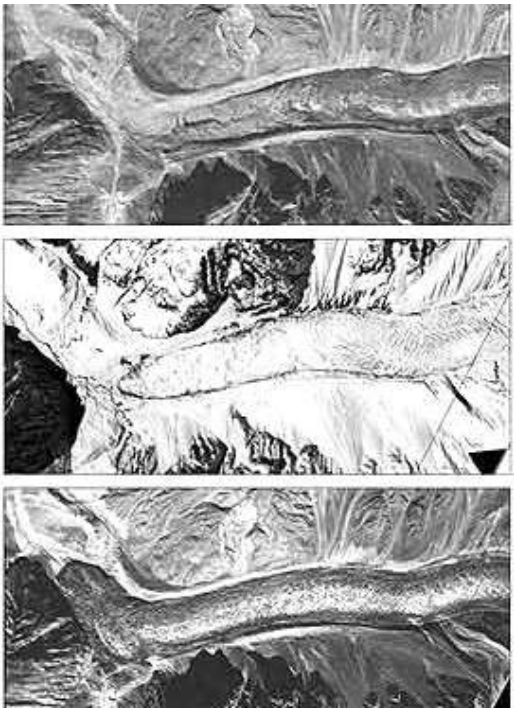


Рис. 5.120. Різночасові аерофотознімки язика льодовика Ведмежого (Памір). Верхній знімок – напередодні переміщення, 21 червня 1988 р.; середній – початок переміщення, 23 березня 1989 р., коли утворилися поздовжні розломи уздовж бортів льодовика (чорні лінії на тлі білого снігу), які свідчать про швидкий рух. Нижній знімок – після переміщення, 3 жовтня 1989 р.

відразу виноситься талими водами, через що він майже не нагромаджується. Окрім цього при сніжниках інтенсивно проявляється соліфлюкція та кріогенна десерпція. При сніжниках затримуються процеси переходу від зими до весни і літа, а часто літні процеси з формуванням рослинного покриву й не відбуваються.

Нівальні ніші з сніжниками добре дешифрують за їхнім контрастним білим зображенням на темніших фонах, за своєрідною формою – переважно трикутною з вершиною вниз по схилу та з розширеною основою у верхній його частині. Щорічно вони сформовані в тих самих місцях і щорічно повторюють свою форму,

стаючи тим самим дешифрувальною ознакою для конкретного гірського регіону. Сніжники можуть "перелітувати" (не розтоплюються протягом літа), через що довкола сніжника майже постійно протягом безсніжного періоду формується і зберігається своєрідна облямівка, що посезонно може змінювати свій фототон та розміри. Останні залежать від зміни фаз розвитку рослинного покриву, чи проективного покриття рослинністю поверхні ґрунту.

Для виявлення та картографування сніжників кращими є знімки, зроблені пізньою весною чи раннім літом.

При сприятливих умовах і після тривалого часу свого існування нівальні ніші можуть переростати в нівально-льодовикові кари або в нівально-ерозійні улоговини. Часто нівально-ерозійні улоговини стають лотками сходу снігових лавин.

*Снігові лавини* тривають недовго, а тому рідко фіксовані знімальними камерами. Однак, їхню діяльність можна дешифрувати за наслідками: сформованими лавинними лотками, лавинними проділами (прочісами), конусами лавинних викидів. При сходженні снігової лавини зноситься не тільки сніг, а й рослинний покрив, навіть ґрунт, а при проходженні снігової лавини через альпійське криволісся та ліс залишаються на схилах витягнуті зверху вниз по схилу прямолінійні смуги – коридори без лісу чи криволісся, пробиті лавиною. Ці смуги лавинних коридорів легко читають на знімках, як смуги трав'яної рослинності в межах поясів субальпійського криволісся та лісового поясу. Лавинні коридори закінчуються на виположених ділянках схилів та на днищах річкових долин, де формуються лавинні конуси виносу, складені снігом, каменистим та ґрунтовим матеріалом, а також поламаними та хаотично відкладеними стовбурами дерев. Під час вивчення лавинно-небезпечних територій знімки дають можливість підрахувати кількість лавинних лотків, їхню густоту та оцінити ступінь лавинної небезпеки території. За непрямими ознаками оцінюють також тип лавин – сухі чи мокрі (типу снігових селів), їхню потужність та частоту сходу. Характеристики лавинних басейнів, отримані за дистанційними та іншими даними, відображають на картах лавинної небезпеки.

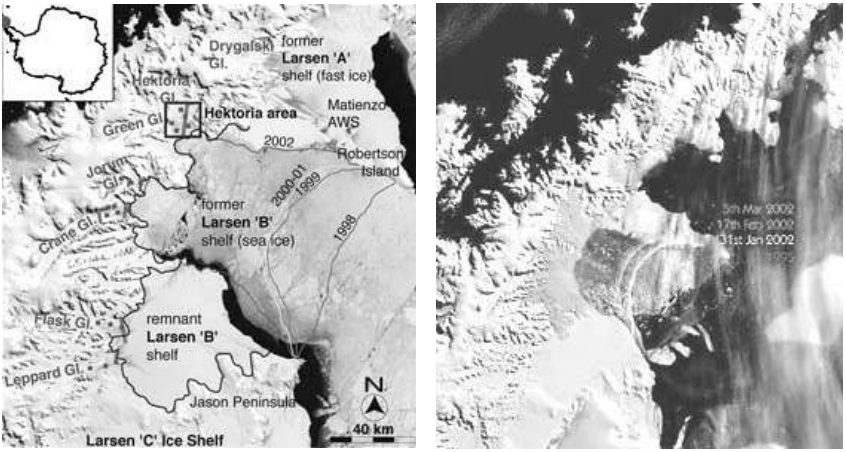
***Вивчення покривного (материкового) зледеніння***

Космічні знімки успішно використовують для моніторингу льодових щитів Антарктиди та Гренландії. Особливо актуаль-

ним це стало в останні десятиліття, коли стали відчутними наслідки глобального потепління. Учені не припускали, що льоди Антарктиди тануть такими стрімкими темпами. В ході досліджень британських фахівців з використанням даних, отриманих з космосу, було з'ясовано, що п'ятий найбільший континент на Землі щорічно втрачає 152 км$^3$ льоду. Вивчення показали, що при таненні тільки західної частини материкових льодів Антарктиди рівень моря може піднятися на 6 метрів. Розрахунки британських фахівців, які спостерігають за Антарктикою (British Antarctic Survey, BAS), зводять нанівець прогнози 2001 року, коли передбачалося, що Антарктида збереже свою масу льоду в 21 столітті. На цьому континенті зосереджені 90% всього льоду на Землі або 70% всієї прісної води. Середня товщина льоду тут складає 1,981 метр.

Найбільш динамічним сніжно-льодовиковим явищем, яке спостерігали з космосу, було руйнування одного з п'яти найбільших льодовиків Антарктиди – льодовика Ларсена у 2002 р. (рис. 5.121). Шельфовий льодовик лише в окремих місцях спирався своєю нижньою частиною на ґрунт – підводні банки або острови. Основна його маса знаходилася на плаву. Його площа становила 3250 км$^2$, а товщина – 200 м. Хоча британські вчені з BAS передбачали його розлом ще чотири роки тому, але вони були вражені швидкістю процесу. Пласт льоду вагою в 500 мільярдів тонн розпався всього лише за місяць! Проте вважають, що руйнування шельфових льодовиків (на відміну від материкових) не викличе різких змін рівня води в океані, оскільки вони самі плавають на воді.

Подібні дослідження льодовикового щита проводять у Гренландії. Тут зосереджені приблизно 10% всього льоду поверхні нашої планети. Маса цієї льодової шапки, другої за потужністю після Антарктиди, оцінюють в 2,5 млн. куб. км. Якщо весь лід Гренландії розтане, це приведе до підвищення рівня Світового океану на 7 метрів. Останнім часом стан гренландських льодовиків став об'єктом особливої уваги, оскільки стало ясно, що якщо вони почнуть швидко танути (в умовах спостережуваного потепління клімату це стає реальністю), то величезна маса прісної води, яка поступить в північну частину Атлантичного океану, може зупинити "конвеєр Брокера" – глобальний круговорот океанічних течій,




*а* *б*

Рис. 5.121. Руйнування льодовика Ларсена в Антарктиді:
*а* – карта з нанесеними межами, станом на 1998, 1999, 2000 і 2002 роки;
*б* – космознімок.

відповідальний за перенесення тепла до північно-західних берегів Європи.

Оцінити масштаб танення гренландських льодів дозволили регулярні спостереження за їхньою масою, що проводяться з 2002 року за допомогою двох штучних супутників, відстань між якими міняється залежно від аномалій гравітації. Згідно підрахункам, щороку втрата льоду тут складає 200 км$^3$. Танення гренландських льодовиків щорічно збільшує рівень води в світі на 0,5 мм, а за останні десять років вода в Світовому океані піднялася на 2,8 мм.

Зменшення льодової маси фіксують також в усій Арктиці в цілому. Маса льоду тут скоротилася до рекордного рівня і продовжує зменшуватися (рис. 5.122). Дані, отримані за допомогою супутникового спостереження, показують, що маса льоду на 2007 р. скоротилася до 5,26 млн. км$^2$. Найшвидше льоди тануть біля берегів Східного Сибіру і в морі Бофорта. Кілька років тому вчені передбачали, що повне танення айсбергів в Арктиці в літній період спостерігатиметься до 2070 або до 2100 р., але тепер це явище може статися вже у 2030 р.

Супутникові спостереження дозволяють вивчати конфігурацію берегової лінії в арктичних і антарктичних морях. Так, вдаєть-

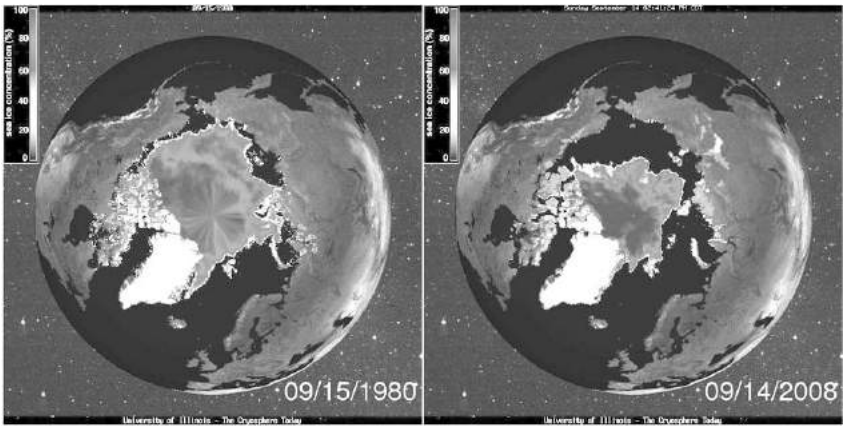



Рис. 5.122. Зменшення льодової маси в Арктиці за даними 28-річних супутникових спостережень (www.lolasuave.livejournal.com).

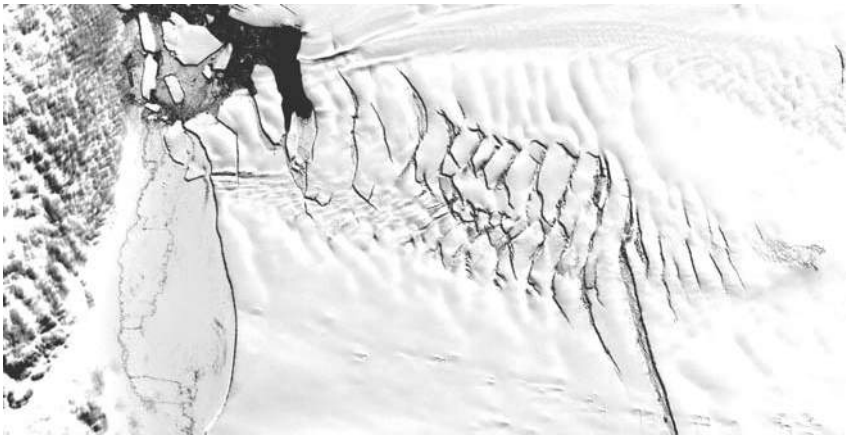
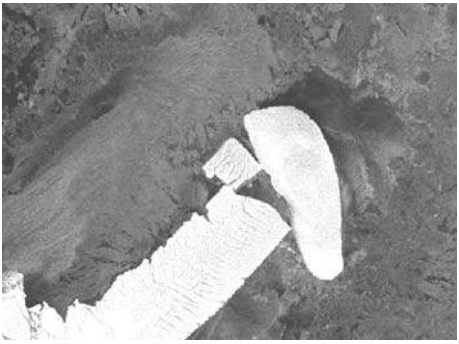


Рис. 5.123. Сповзання у воду прибережного льодового щита, руйнування берегового припаю і відокремлення крижин.

ся відслідковувати розколювання берегового припаю[21], його відокремлення від берегів та переміщення, формування айсбергів, їхні міграції та міграції льодових полів (рис. 5.123–5.124). Особливо

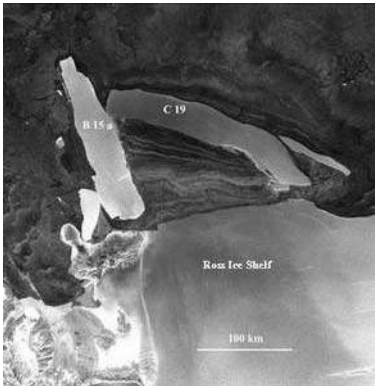
[21] Припай береговий – морський нерухомий лід вздовж берегів, примерзлий до берега, а на мілинах – і до дна. Формується восени, руйнується пізньою весною і літом.



*а*

*б*

*в*




*г*

Рис. 5.124. Формування айсбергів із льодовикових язиків прибережної зони Антарктиди, які висуваються в море і обламуються:
*а* – льодовиковий язик станом на 1999 р., від якого утворився айсберг;
*б* – надводна і підводна частини айсберга; *в* – формування одного з найбільших плавучих об'єктів B15a довжиною 115 км і площею 2,5 тис. км$^2$ (космознімок зі супутника ERS, 2000 р.), *г* – утворення чергового айсберга C19 (космознімок зі супутника Envisat, 2002 р.). (www.web2.0antarctida.ru).

простежують за просуванням айсбергів, визначають їхні координати, швидкість руху і передають найближчим суднам, які знаходяться на їхньому шляху.

Крім досліджень льодових берегів, космічне знімання відкрило можливості вивчення підльодного рельєфу. На знімках поверхні льодовикового щита просвічують деякі структурні елементи рельєфу і навіть великі форми, як, наприклад, вулканічні конуси (рис. 5.125). Причому, наземні спостереження фіксують звичайні засніжені рівнини, тоді як на знімках за структурою чи текстурою зображення відчитують долини, структурні плато, гірські хребти і навіть, за непрямими ознаками, виявили велике озеро. Так, поблизу російської станції Восток відкрили гігантське підльодовикове озеро, довжина якого близько 250 км, ширина – 50 км, глибина – до 750 м. Проте свердловина, пробурена над ним в товщі льоду і зупинена на глибині 3623 м (всього у декількох десятках метрів від озера), поки не торкнулася води. Буріння припинене через небезпеку нестерильного відбору проб, здатного пошкодити унікальну

Рис. 5.125. Згаслий вулкан в льодовому панцирі, виявлений як опукла аномалія на космічних знімках. На поверхні ніяких "кругів в льодах" не видно. Таких як цей сплячий вулкан в Антарктиді велика кількість. Це ще раз доводить, що п'ятий континент нашої планети не завжди був скутий льодами.

реліктову систему озера. Це рішення було ухвалене в 1998 р. на засіданні SCAR (Scientific Counsil for Antarctic Research) — міжнародного наукового комітету з антарктичних досліджень.

Таким чином, дистанційні дослідження покривного зледеніння передбачають вивчення льодового панцира і підльодного рельєфу, динаміки прибережних льодовиків та їхніх утворень.

***Вивчення снігового покриву***

Сніговий покрив щорічно покриває площу від 115 до 126 млн. км$^2$, приблизно 2/3 цієї території припадає на сушу, а 2/3 на морські льоди (головним чином в арктичному і антарктичному басейнах). Сніговий покрив, який залягає безперервно більше одного місяця, називають стійким, а при заляганні менше цього терміну – тимчасовим. На суші постійний сніговий покрив формується на льодовиках Антарктиди, Гренландії, деяких островів Північного Льодовитого океану, а також у високогірних районах з інтенсивним зледенінням (Анди, Кордільєри, Гімалаї, Тібет та ін.). Стійкий сніговий покрив утворюється на території Росії та у Північній Америці – від 40° пн. ш. і північніше, у Центральній Азії, на північному сході Китаю, в північних частинах Кореї і Японії, в Африці – в горах Атласу. На більшій частині Західної Європи, нагір'їв Передньої Азії, в Східному Китаї, на півдні США і в багатьох гірських районах сніговий покрив нестійкий. Космічне знімання вперше відкрило можливість одночасної фіксації на значних територіях границь поширення снігового покриву.

Границя між територіями, покритими снігом і територіями без нього, виглядає на дрібномасштабних знімках як границя поміж білим та чорним. Складання карт наявності, динаміки встановлення та сходження снігового покриву необхідні для сільськогосподарських прогнозів та корекцій, а також для метеорологічних оцінок, гідрологічних прогнозів. Для вивчення снігового покриву використовують знімки з метеорологічних та деяких ресурсних супутників, які забезпечують оперативне поступлення інформації.

Вивчення снігового покриву утруднене в заліснених районах рівнин. Площі лісів зображаються темними відтінками фототону, вони закривають сніг на поверхні землі, тому під час дешифрування орієнтуються на засніжені лісові галявини, безлісі болота, долини рік, озер, вирубки (рис. 5.126). У гірських районах границю

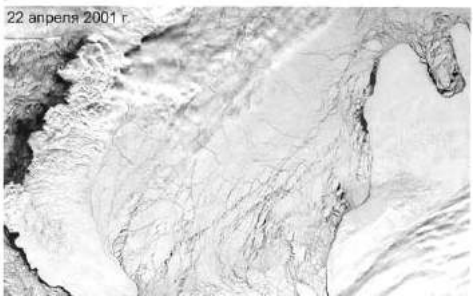
снігового покриву виявляють за дендритовим чи перистим малюнком зображення, чітким зв'язком розподілу снігу з рельєфом.

Крім границь поширення снігового покриву, за знімками дешифрують вітрові форми рельєфу на поверхні снігу. Це дає матеріал для вивчення сніговіїв та шляхів їхнього перенесення. За тінями інтерпретують снігові карнизи, за яскравими фототонами – навіяні сніжники та інші форми вітрового перерозподілу снігу, що також є об'єктами вивчення міграцій снігових хуртовин.

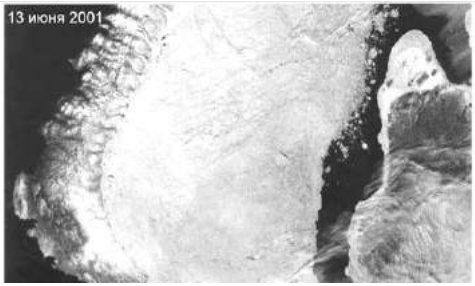
Важливими характеристиками снігового покриву є його висота або потужність, які потрібні під час визначення водного запасу для гідрологічних цілей. Ці дані за знімками з'ясовують на основі яскравісних характеристик снігу – чим більша потужність, тим більшою є його яскравість. Проте, якщо потужність досягне 15 см, яскравість снігу під час подальшого його накопичення, змінюватиметься слабко.

Рис. 5.126. Стійкий сніговий покрив на півночі Росії (північно-східна частина Кольського п-ва (зліва), п-ів Канін, о. Колгуєв (в центрі знімка) та узбережжя Баренцового моря знаходяться в зоні тундри, сніговий покрив тут чіткий; на південь від зазначених територій починається лісова зона (темний фототон внизу знімка), тому наявність снігу ідентифікують за світлим фототоном безлісих долин рік).

Перший знімок (5 березня): паковий лід з торосами, пригнаний вітром в Карське море стикувався з островами Нова Земля так, що майже не помітна різниця поміж островами і морем.




Другий знімок (22 квітня) Лід розтрісканий на малі крижані поля, проте чиста вода появилася тільки біля материкового берега Ямалу.




Третій знімок (13 червня): виразно видно південний острів Нова Земля, значно розширилась вільна від льоду вода вздовж півострова Ямал, проте "забереги" ще не розтанули.

Четвертий знімок (10 серпня): південний острів Нова Земля, півострів Ямал та острів Бєлий майже звільнилися від снігу. Протока Карські Ворота та Карське море вільні від льоду. Береговий припай біля східних берегів Нової Землі ще зберігається і має ширину 100–200 км.

Рис. 5.127. Динаміка крижаних полів Карського моря і східного берегового припаю островів Нова Земля.

Оскільки практичний аспект вивчення снігового покриву пов’язаний з гідрологічними прогнозами, головна роль під час досліджень належить вивченню танення снігу, зокрема, виявленню зон, охоплених таненням, фронту і тилу танення. Відбивна здатність снігу, що тане, в інфрачервоній зоні різко падає, чого не відбувається із стійким снігом. Тому для даних досліджень важливо порівнювати знімки, зняті у видимій та інфрачервоній зоні.

Вагомими є дистанційні дослідження динаміки снігового покриву (рис. 5.127). Через те, що космічні знімки охоплюють величезні території, з’являється можливість простежувати динаміку снігового покриву навіть в межах всієї земної кулі. Різночасові дослідження з періодом у кілька днів, тижнів чи через місяць дозволяють виявляти швидкість відступу снігового покриву та особливості динаміки його весняного танення. Цікавими є прояви проходження через помірні широти так званої “зеленої хвилі” – часу появи зеленого листя і достигання трав після відступу снігу.

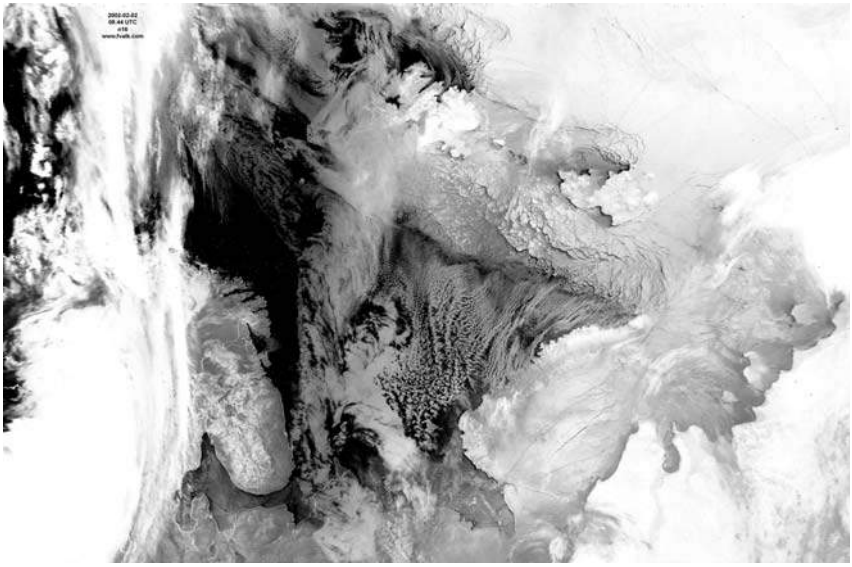


Рис. 5.128. Хмари (західна, центральна і південно-східна частини) і льоди (північно-східна частина) Арктичного басейну. У південно-східній частині чіткою білою межею виділений береговий припай.

Труднощі використання космічних знімків під час дешифрування сніжно-льодових явищ пов'язані з проблемами розпізнавання хмар та сніжно-льодових утворень (рис. 5.128). Хмари за своїми показниками спектральної яскравості практично не відрізняються від снігових та льодових поверхонь, бо верхні частини хмар (або всі білі хмари) складаються з снігу, кристаликів, крупинок льоду чи граду. На знімках найчастіше хмари і сніг розрізняють за структурою зображення. Зображенню снігового покриву рівнин властивий рівний фототон і безформна структура. В межах снігового покриву проявлені не засніжені елементи поверхні, наприклад, русла рік, ставки. Зображення хмар характеризоване пластівчастою чи волокнистою структурою. Хмари на знімках часто зображені разом з тінями: видно білі плями хмар, які супроводжують темні плями тіней. У горах основними відмінами є дендритовий малюнок границь снігового покриву на відміну від м'яких обрисів зображення хмарності.

Дослідження сніжно-льодових явищ, окрім вивчення їхніх поверхневих утворень, можуть включати виявлення скритих, підземних форм, пов'язаних з багаторічною мерзлотою. Вікова мерзлота не може бути віддешифрована за прямими ознаками, але може бути інтерпретована опосередкована через форми рельєфу та морозні явища. Детальна інформація про дешифрування кріогенних форм рельєфу та явища, які їх супроводжують, подана в підрозділі 5.3.

## 5.10. Дешифрування соціально-економічних об'єктів

Використання матеріалів аерокосмічних знімань дає змогу аналізувати широкий комплекс об'єктів соціально-економічного призначення (самих об'єктів, їхніх груп, сукупностей, систем і т. п.), процесів (розвитку, функціонування, переміщення), відносин (взаємодії, ієрархії, залежності, відповідності і т. д.). Аерокосмічні дослідження дозволяють виконувати економіко- і соціально-географічні розвідки різного плану – регіональні, галузеві, проблемно-орієнтовані, як прикладного, так і теоретичного характеру.

Аерокосмічна інформація у соціально-економічних дослідженнях забезпечує підготовчі етапи формування системи рег-

ламентуючих і передпланових документів галузевого, регіонального і проблемного характеру, які визначають головні напрями розвитку і територіальної організації продуктивних сил, а саме, схем розвитку і розміщення продуктивних сил країни в цілому і економічних районів, зокрема, галузей виробництва, системи розселення, охорони природи, проектів народногосподарських комплексів, схем і проектів районних планувань промислових районів і вузлів, областей, прогнозів розвитку найбільших і великих міст, генпланів міст і сільських поселень, угрупувань підприємств, аграрно-промислових формувань та інших об'єднань.

Прикладний аспект використання аерокосмічних матеріалів не вичерпується передплановими обґрунтуваннями. Результати інтерпретації можуть використовуватися в розробці концепцій територіальної структури (каркаса) господарства і розселення, в проектних роботах (вибір трас інженерних споруд лінійного типу, опрацювання компонувальних схем вузлів і комбінатів, оцінка інженерно-географічних та інженерно-економічних чинників і умов будівництва, обґрунтування планувальних ситуацій, обмежень і т. п.), а також в оперативному управлінні (стеженні за ходом сільськогосподарських робіт, за станом повітряного і водного середовищ і т. д.).

Результати інтерпретації аерокосмічної інформації можуть бути реалізовані і закріплені в різних за складом та змістом картографічних документах, які, разом з вирішенням задач обслуговування економіко- і соціально-географічних досліджень, можуть мати ширше призначення. Як першочергові для розробки можна вказати карти міжгалузевого, комплексного значення, що відображають функціональне районування території (функціонально-територіальну структуру) і можуть служити базовими для практичних розробок широкого кола наукових і проектних організацій, а також органів господарського управління в центрі і на місцях.

### *5.10.1. Методи та ознаки дешифрування*

Під час інтерпретації аерокосмічної інформації для вивчення соціально-економічних об'єктів застосовують три групи методів: 1 – фотостатистичні (засновані на математичних операціях з характеристиками щільності зоб-

ражень); 2 – індикаційно-статистичні (засновані на визначеннях зв'язків між різноманітними явищами і математичній обробці геометрично-морфологічних та інших параметрів об'єктів, зображених на знімках); 3 – ситуаційно-логічного аналізу (засновані на поєднаннях традиційних прямих і непрямих дешифрувальних ознак, інтерпретаціях територіальних поєднань і структурних композицій об'єктів на фотозображеннях, а також на дешифруванні за еталонами) [72].

Під час аналізу соціально-економічних об'єктів на аерофото- і космічних зображеннях застосовують всі групи дешифрувальних ознак – прямі прості (форма, фототон або колір, тіні, розміри об'єкта), прямі комплексні (структура і текстура зображення) та непрямі ознаки.

*Фототон* на знімках є функцією яскравості об'єкту і як дешифрувальна ознака непостійна і може змінюватися в значних межах для соціально-економічних об'єктів одного і того ж типу залежно від умов знімання і технології обробки знімальних матеріалів. Тому головна увага під час інтерпретації повинна бути звернена на співвідношення фототонів (тонові контрасти). Соціально-економічні об'єкти рідко зображаються однорідним фототоном. Виняток становлять гладкі або одноманітні поверхні. Великою постійністю порівняно із фототоном на чорно-білих знімках відрізняється колір об'єктів на знімках з природними чи синтезованими кольорами. Насиченість фототонів (кольорів) змінюється залежно від часу і умов знімання, стану атмосфери і технологічних умов обробки матеріалів. Тому для інтерпретації часто розробляють еталонні шкали кольорів, за якими на основі впевнено віддешифрованих соціально-економічних об'єктів (еталонів) ідентифікують ті, які розпізнають невпевнено.

*Форма* елементів зображень служить головною дешифрувальною ознакою соціально-економічних об'єктів. Це стосується їхніх контурів в плані, характеру меж і зовнішнього вигляду. Більшість соціально-економічних об'єктів мають в плані геометрично виразну стійку форму (прямокутну, лінійну, округлу) і достатньо чіткі межі, що "видають" їхнє антропогенне походження. Ці об'єкти часто об'ємні, що може полегшити їхнє розпізнавання, особливо на аерофотознімках, за виникаючим ефектом "падіння" зображення високого об'єкта, яке виникає в напрямі від центра знімка.

Ознака форми важлива під час дешифрування різночасових знімків для розмежування стабільних і динамічних соціально-економічних утворень. Більше того, сам характер зміни геометричних (а також яскравісних) характеристик зображення цих утворень в часі можна розглядати як самостійну дешифрувальну ознаку.

Масштаби аерофото- і, особливо, космічних знімків не дають безпосереднього уявлення про натуральні розміри соціально-економічних об'єктів, у зв'язку з чим ознака *розмір* під час дешифрування має лише відносне значення – більше або менше пізнаваний об'єкт того або іншого пізнаного об'єкту. При такого роду зіставленнях необхідно приймати до уваги роздільну здатність знімків і обумовлені масштабом спотворення розмірів і форм об'єктів.

Значення *тіні* як дешифрувальної ознаки неоднозначне: в одних випадках тіні допомагають інтерпретації, в інших створюють інформаційний шум. Під час розпізнавання соціально-економічних об'єктів переваги тіні як дешифрувальної ознаки очевидні. Власні тіні (неосвітлені сонцем частини об'єктів) підкреслюють їхню об'ємність, падаючі тіні (ті, що кидають об'єкти) підкреслюють їхню форму, оскільки контраст тіні від об'єкту по відношенню до фону перевершує контраст тону об'єкту до фону. Слід пам'ятати, що тінь – досить динамічна ознака (змінюється протягом доби). Вона може іноді перевищувати розмір об'єкта (в разі низького положення Сонця). Дана ознака знаходить застосування, наприклад, для виявлення поверховості житлової забудови, опор ліній електропередач, високих споруд промислових підприємств – труб, градирень, вишок тощо.

*Структура зображення* як ознака інтерпретації соціально-економічних об'єктів більше застосовується для виявлення площинних об'єктів. Це, наприклад, урбосистеми, які зображаються квадратно-комірковими структурами, чи орні землі, що мають на знімках ґратчасту структуру зображення. Текстура передає впорядкованість елементів соціально-економічних систем. Так, лінійно-смугастою текстурою зображаються залізничні колії на станціях та вокзалах, смугасто-зигзагоподібною – системи валів і водойм у долинах рік в місцях золотовидобувних підприємств, лінійною – меліоративні мережі.

*Непрямі дешифрувальні ознаки* соціально-економічних об'єктів знаходять віддзеркалення на знімках у вигляді слідів дій цих

об'єктів на навколишнє середовище. Природні компоненти часто виступають при цьому у якості простих індикаторів: незамерзла водойма – джерело теплового забруднення вод; засолення орних земель – система меліорації; просіки і смуги відчуження – траси інженерних споруд лінійного типу; вирубки – лісовидобувні підприємства; водосховище – гідроелектростанція, водоємні і електроємні виробництва тощо. Вони також можуть бути комплексними індикаторами, коли беруться до уваги сукупності, поєднання, "ланцюжки" слідів дій, їхній характер і малюнок, а також сліди – реакції компонентів природного середовища на такі дії [72].

Залежності розміщення і просторових композицій елементів соціально-економічних територіальних систем від природних чинників та умов не завжди можуть бути однозначно визначені за аерокосмічними знімками. "Сліди" таких зв'язків у більшій мірі виявляються відносно сільськогосподарських, рекреаційних та інших подібних систем.

Велике значення під час інтерпретації аерокосмічних матеріалів має накопичення різних типових фотографічних зображень конкретних об'єктів і систем, які можуть бути використані як еталони. Шляхом зіставлення з еталоном полегшується їхня інтерпретація.

### *5.10.2. Дешифрування видів соціально-економічних систем*

Соціально-економічні системи за народногосподарським профілем підрозділяють на системи промислового, сільськогосподарського, транспортного, селитебного, рекреаційного і соціально-культурного призначення. Вони досить чітко розрізняються на аеро- і космічних знімках за прямими і непрямими ознаками.

***Промислові об'єкти і системи***

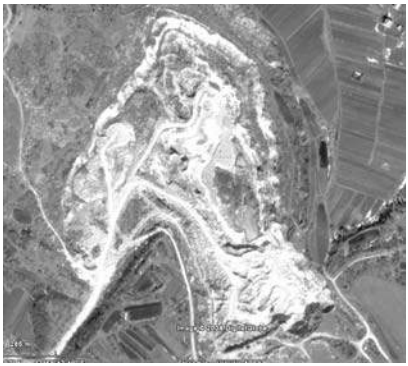
Промислові об'єкти пізнають здебільшого на великомасштабних знімках, хоча окремі об'єкти такі як, наприклад, кар'єри, видно і на середньомасштабних. Вони виділяються різкими тональними переходами, геометричними формами, розмірами, певною зв'язністю елементів зображення, які характерно розташовані по відношенню до інших елементів (послідовність, примикання, відступ тощо). В більшості випадків можливо розрізнити підприємства видобувної промисловості, енергетики та оброблювальної промисловості, а часто ще і їхню галузеву приналежність.

Підприємства з видобутку руди, твердого палива, будівельних матеріалів пізнають за головними складовими фотомалюнку. *Кар'єри* інтерпретують як від'ємні форми антропогенного рельєфу, частіше витягнутої або овальної форми, темного, темно-сірого, сірого і світлого (майже білого) фототонів (залежно від виду корисної копалини), з внутрішнім концентричним спіралевидним малюнком (іноді у вигляді паралельних ступенів), що відображає технологію вскришних робіт. У неглибоких кар'єрних виїмок наявні лінійні, штрихові, смужкові елементи на фоні білуватого чи сірого фототону чаші кар'єру (рис. 5.129.*а*).

*Відвали* дешифрують як додатні форми антропогенного рельєфу різноманітної геометричної форми (залежно від способу транспортування вскришних порід), площа яких, як правило, перевищує площу кар'єрів; фототон зображення – світліший у порівнянні з кар'єрами, іноді темніший, що залежить від ступеня заростання відвалу та характеру вскриші (рис. 5.129.*б*). Часто виявляється можливим встановити спосіб транспортування складованих у відвал вскришних порід, яке здійснює залізничний, автомобільний або конвеєрний транспорт. Залізничні відвали виділяють за тупиковими і кільцеподібними схемами подачі породи. Відвали з кільцеподібною схемою відвалотворення морфологічно схожі з кар'єрами, відмітними ознаками перших можуть служити – світліший фототон, вираженість у вигляді додатної форми рельєфу і відсутність транспортного зв'язку з підприємством з первинної переробки корисної копалини (тоді як кар'єри пов'язані і з відвалами, і з підприємствами з переробки сировини). Малюнок відвалів зі способами подачі породи конвеєрним чи автомобільним транспортом зазвичай конусоподібний або віялоподібний, при цьому автомобільні відвали нижче і відрізняються ярусною будовою (рис. 5.129.*в*).

Додатковою ознакою відвалів можуть служити іноді помітні на них плями темнішого тону з регулярною смугастою або комірчастою структурою зображення – ділянки і зони рекультивації (зазвичай фітомеліорації).

Відмітна ознака гідровідвалів – їхнє положення в природних від'ємних формах рельєфу, зазвичай у верхів'ях ярів і балок, відсічених дамбами; іноді це замкнуті або напівзамкнені багатокутники, обкреслені греблями. У них виділяються, так званий, пляж



*а*

*б*

*в*

*г*

Рис. 5.129. Кар'єри, відвали та кар'єрно-відвальні комплекси Львівщини:
*а* – Миколаївський кар'єр цементних глин; *б* – Новороздільський відвал покривних порід (космознімки розрізненням 5 м);
*в* – Новояворівський гірничо-видобувний комплекс станом на 1989 р. (на північному сході знімка – фрагмент сірчаного кар'єру, на півдні – відвал, побудований конвеєрним способом подачі пустих порід; аерофотознімок масштабу 1:14 000); *г* – Новояворівський комплекс станом на 2009 р. (кар'єр заповнений водою, відвал задернований; космознімок розрізненням 30 м).

Рис. 5.130. Гідровідвал Роздільського сірчаного комбінату.

– пилувата чи піщана "відпрацьована" частина, що зображається на знімках світлішим тоном, і ставкова частина, що відображається темнішим тоном (рис. 5.130). Гідровідвали на знімках за зовнішніми ознаками схожі зі хвостосховищами (місцями відведення відходів збагачувальних підприємств), які будуються за таким же принципом. Розрізнити ті та інші на знімках допомагає аналіз зв'язків: гідровідвали пов'язані з кар'єрами, хвостосховища – із збагачувальними підприємствами.

Характерними ознаками *шахтного видобутку* руди, вугілля та інших корисних копалини є зображення конусоподібних відвалів пустої породи –териконів, що мають темний фототон на знімках (рис. 5.131). Своєрідні надшахтні споруди – копри видно на знімках, роздільної здатності 5 м і більше.

Території розробки корисних копалини насичені транспортними об'єктами, вантажними, складальними і перевантажувальними майданчиками і станціями, численними ґрунтовими дорогами.

Істотною ознакою для розмежування підземних і відкритих гірничих розробок служить їхнє положення: відкриті розробки,

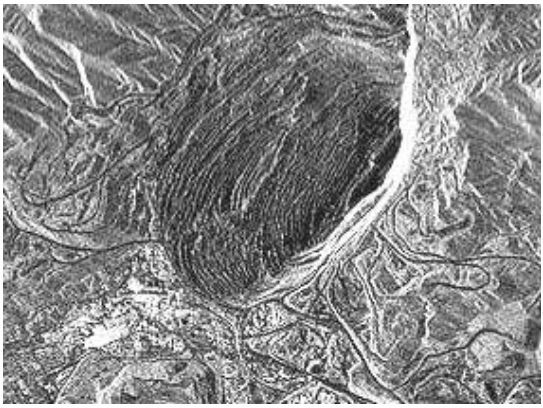
Рис. 5.131. Шахта поблизу с. Сілець на Львівщині (конусоподібною формою виділений терикон).

як правило, віддалені від житлових територій (селищ або міст) і пов'язані з ними хорошими автодорогами (іноді залізницею), тоді як шахти можуть розташовуватися й у житловій зоні.

У багатьох випадках за знімками вдається встановити типи і навіть види мінеральної сировини, яку видобувають (тобто галузеву спеціалізацію видобувного підприємства). Так, фототон відвалів залізорудних родовищ, як правило, – майже білий, а кар'єрів з видобутку залізної руди – світло-сірий та сірий. Міднорудні кар'єри і відвали зазвичай темнішого тону – від темно-сірого до майже чорного (рис. 5.132). За поєднанням ознак фототону (білий–майже білий) і геометричній формі (близькою до прямокутної або трапецієвидною з чіткими межами і кутами) можуть бути пізнані кар'єри з видобутку марганцевих руд. Кам'яновугільні кар'єри (розрізи) відрізняються характерним рисунком – витягнутою формою (що нагадує траншею), а також майже чорним фототоном. При гідравлічному способі видобутку вугілля додатковою ознакою може служити наявність відстійників.

Кар'єри з видобутку будівельних матеріалів зазвичай відрізняються від рудних та вугільних скромнішими розмірами, відсутністю відвалів і світлішим фототоном (див. рис. 5.129.*а*). Форми кар'єрів можуть бути найрізноманітнішими – витягнутими, округлими або прямокутними. Фототон крейдяних, ванякових

*а*



*б*

Рис. 5.132. Кар'єри з видобутку руди:
*а* – залізної (Іркутська область), *б* – мідної (Чилі, найбільша в світі за глибиною антропогенна виїмка).

і піщаних кар'єрів – білий-майже білий, такий, що різко контрастує з оточенням (у крейдових особливо яскравий). Фототон глиняних кар'єрів сірий; вони, як правило, не виділяються на тлі оточення, тому їхні відмітні ознаки слід шукати у формах об'єктів – зазвичай замкнутих, місцями розмитих із злегка хвилястими контурами, переважно овальних або округлих. Додаткові ознаки кар'єрів будівельних матеріалів – їхнє положення за межами житлових зон населених пунктів (піщані і глиняні кар'єри можливі і на їхніх околицях), наявність численних ґрунтових чи асфальтових під'їзних шляхів. У районі кар'єрів можна бачити сліди локальних порушень компонентів природного оточення. Більшою мірою такі порушення супроводять кар'єри з видобутку вапняку і крейди – білий наліт на прилеглих територіях і на дорогах є непрямою ознакою для інтерпретації підприємств, що діють, такого роду.

Додаткову інформацію про наявність і профіль добувного підприємства можуть дати сліди його дії на довкілля. Площі навколо кар'єрно-відвальних комплексів відрізняють за світлішим фототоном за рахунок зменшення гумусності і вологості ґрунтів, збільшення запиленої і т.п. Сильні зміни помітні в структурі гідрографічної та ерозійної мережі – за рахунок створення водосховищ, ставків, відстійників та інших споруд.

За знімками чітко виділена динаміка кар'єрно-відвальних комплексів, площа їхнього зростання, напрям збільшення, ступінь руйнування природного рельєфу. Добре читають стадії формування цих комплексів – зародження виїмок, активна експлуатація, заростання форм та їхня рекультивація.

Своєрідний малюнок фотозображення *у розробок розсипних родовищ* корисних копалин (золота, платини, алмазів, олова та ін.). Його домінуючі елементи – природні або штучні водоймища, гідроспоруди, що створюють підпір води, світлі плями підготовлених до розробки полігонів, що носять сліди машинного розчищення, і, що дуже істотно, відвали перемитої породи – довгі смугасті дугоподібні утворення дуже світлого тону, що простягаються від одного борту водойми до іншого (рис. 5.133).

Фотомалюнки *експлуатованих родовищ нафти і газу* мають різні поєднання: а) майданчики нафтопромислів зображаються як округлі плями світлого тону зі світлими нитками доріг і нафтопроводів, що розходяться, (світлий тон майданчиків – наслідок

*б*

*а*

Рис. 5.133. Долини рік у місцях розробок золота:
*а* – Якутія, *б* – Каліфорнія.

пригніченого рослинного покриву і розливів глинистого розчину навколо бурових установок) (рис. 5.134.*а*). На аерофотознімках великого масштабу пізнаються і самі бурові вежі за характерними тінями; б) резервуари для зберігання нафти видно у вигляді світлих об'ємних круглих форм, що підкреслюються заокругленими тінями (рис. 5.134.*б*), або у вигляді прямокутників, розташованих компактними групами і оконтурених чіткими межами; в) відкриті сховища нафти – плями чорного тону, що повторюють конфігурацію природних або штучних понижень рельєфу, або прямокутні зі світлими краями – слідами обвалування; г) димові шлейфи від факелів у разі спалювання на родовищі попутного газу – смуги темного тону з нечіткими краями, що поступово розпливаються, орієнтовані за напрямом вітру (що розширюються від джерела); д) нафтопроводи і численні дороги, головним чином, тимчасові ґрунтові, по яких здійснюються внутрішні зв'язки на нафтопромислах і які утворюють на знімках ієрархічно організовані мережі.

Характерні дешифрувальні ознаки трас нафтопроводів (що відрізняють їх від доріг) – більш різкі повороти, виходи на поверхню труб у пониженнях рельєфу, широкі смуги відчуження в декілька десятків, або навіть сотень метрів із значними порушеннями рослинного покриву земляними роботами і транспортом (уздовж траси нафтопроводу і паралельно їй, як правило, проходить дорога, лінії електропередач). На знімках уздовж траси іноді простежують сліди аварійних розливів нафти і зливів промивальних розчинів.

Додатковими ознаками нафтових промислів на знімках служать сліди їхнього впливу на компоненти природи. На знімках видно нафтові озера – чорні плями овальної форми з чіткими межами, забруднені суспензіями ділянки водоймищ освітленого тону (результат намивання піску для майданчиків нафтопромислів), помітні сильні порушення ґрунтово-рослинного покриву на всій території, а в аридних районах сліди засолення.

Дешифрувальні ознаки *газових родовищ* багато в чому подібні описаним. Тут проте немає слідів нафтових забруднень ні в зоні промислу, ні уздовж трас газопроводів.

З інших підприємств добувної промисловості добре пізнають на знімках *солевидобувні підприємства*. Характерною ознакою служить більш менш регулярна мережа дамб, що розгороджує

*а*

*б*

Рис. 5.134. Підприємства з видобутку нафти:
*а* – родовище зі свердловинами (Оман);
б – нафтові термінали на узбережжі.

ділянку водоймища на осередки різного фототону – від світлого до темно-сірого, що залежить від глибини водоймища в осередку і концентрації солей у воді. Добре виділені білі плями сольових кірок. В місцях підземного видобутку солей на поверхні залишаються безсистемні групи соляних ван (рис. 5.135).

*Торфовидобувні* підприємства інтерпретують на знімках за характерними полями торфовидобутку – системі або мозаїці різнотонних смуг, що чергуються, і прямокутників майже правильної геометричної форми, темніший тон відрізняє вологі (свіжі) ділянки розробки, світліший – сухі. Чіткими формами виділені системи магістральних і проміжних дренажних каналів. На великих родовищах торфу, як правило, є декілька полів видобутку, від яких відходять до центральної вантажної станції вузькоколійні залізниці, які мають специфічний малюнок, що гілкується

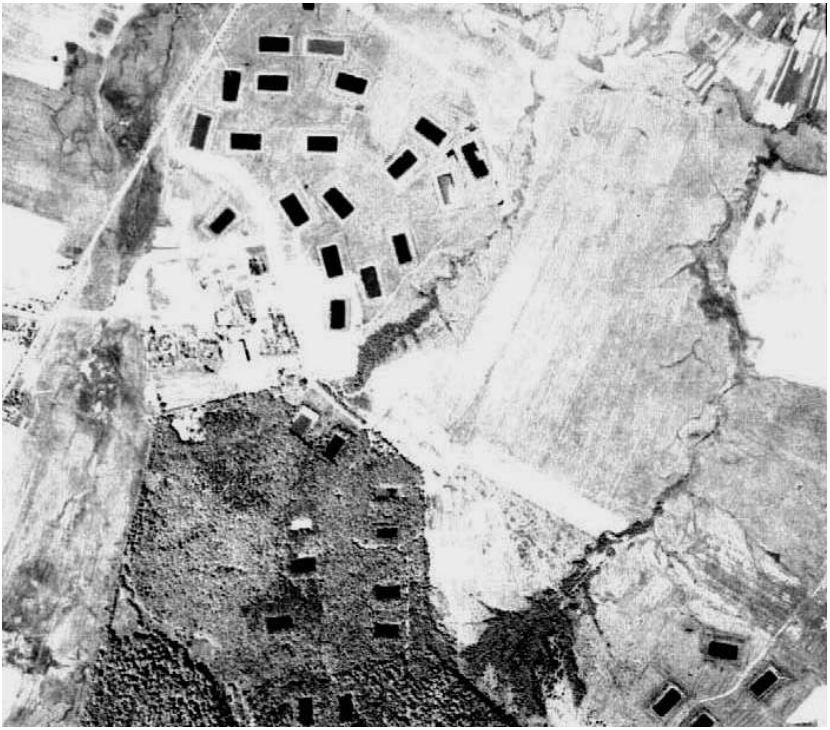


Рис. 5.135. Соляні ванни поблизу м. Стебник Львівської обл.

(рис. 5.136). Остання пов'язана широкою дорогою з магістральною залізницею.

*Лісозаготівельні підприємства* інтерпретують за наявності системи ланок – ареалів вирубок, складів заготовленої деревини, лісовозних доріг (на великих заготовках це можуть бути і залізниці). У плановому зображенні ці ланки утворюють характерну деревовидну структуру, що чітко виділяється за геометрією і фототоном на темному фоні лісової рослинності. *Вирубки* зображені на знімках більш світлими плямами з різкими ламаними межами, які, як правило, не узгоджуються з природними контурами. На світлому фоні можуть спостерігатися окремі темні плями – сліди залишених для лісовідновлення ділянок лісу. До вирубок обов'язково примикають дороги.

*Підприємства з виробництва енергії* належать до об'єктів, які добре інтерпретують на дистанційних матеріалах. За знімками можуть бути встановлені всі головні їхні види – теплові (конденсаційні і теплофікації), атомні, гідравлічні електростанції, а також великі районні котельні.

Рис. 5.136. Місця торфовидобутку на Малому Поліссі.

*Теплові* електростанції пізнають, головним чином, за великою будівлею у формі витягнутого прямокутника темно-сірого тону і розташованим уздовж нього високими трубами, градирнями – охолоджуючими баштами циліндрової форми, що відображені круглими плямами світлого тону, підкресленими тінню, складами палива – прямокутниками темно-сірого і чорного тону, під'їзними залізничними вітками, шлаковідвалами (останні дешифруються не завжди). Дими над трубами і пара над градирнями можуть як маскувати, так і сприяти розпізнаванню електростанцій. Замість градирень іноді розташовані великі водоймища. Знімання в інфрачервоній тепловій зоні виявляє підвищену температуру об'єкта і прилеглих до нього територій, а також води у водоймищах.

*Атомні електростанції* інтерпретують на знімках, як і теплові, за формою і фототоном головної будівлі, трубами, ставками-охолоджувачами (або градирнями), баками очищення води (рис. 5.137). Тут відсутні великі склади палива і шлаковідвали. На інфрачервоних теплових знімках фіксують підвищене виділення тепла.

*Гідроелектростанції* інтерпретують за зображенням дамб – білими смужкам упоперек рік, водосховищами – потовщеними ділянками рік вище за дамби, світлим фототоном води в нижньому б'єфі на ділянці, що примикає до дамби, незамерзаючими ополонками у нижньому б'єфі – темними плямами уздовж течії ріки на зимових знімках, по лініях електропередачі, що розходяться від станції. Дериваційні ГЕС виявляють за зміненою шириною русла ріки, каналам відведення води, на великих ДРЕС дешифрують дамбу.

*Підприємства оброблювальної промисловості* пізнають на знімках за рядом ознак – чіткими геометричними контурами промислових площадок з огорожею, що добре виділяє їх на навколишньому фоні, примиканням майданчиків до під'їзних транспортних шляхів, наявності ряду великих нестандартних будівель цехів і закритих складів – витягнутих прямокутників сірого фототону, чергування будівель цехів з дрібнішими спорудами і з відкритими складами сировини, палива та готової продукції, наявності характерних споруд – високих димлячих труб, паруючих градирен тощо, які дешифрують за прямими ознаками, зокрема, за відсутністю зелених насаджень у тій мірі, в якій вона характерна населеним пунктам. Підприємства часто розміщені в периферійних частинах поселень або за їхніми межами.

*а*

*б*

Рис. 5.137. Вигляд енергетичних підприємств на космознімках:
*а* – Волзька ГЕС у Росії, *б* – фрагмент АЕС.

Розміщення багатьох підприємств оброблювальної промисловості визначають деякі природні чинники, наприклад, наявність води, що обумовлює їхнє тяжіння до берегів рік, озер, водосховищ і допомагає виявляти їх на знімках. Непрямими ознаками можуть бути також численні сліди дій будівництва і функціонування підприємств на компоненти природного середовища (інженерна підготовка території, гідроспоруди, відстійники, запилення і задимлення, теплові забруднення, знищення деревної рослинності).

Виділення за знімками профілю і галузевої приналежності промислових підприємств вдається далеко не завжди. Добре дешифрують на великомасштабних аеро- і космічних знімках збагачувальні фабрики, металургійні і нафтопереробні заводи. Слабо інтерпретують виробництва ряду галузей хімічної промисловості, машинобудування, деяких галузей легкої і харчової промисловості. Не інтерпретують на знімках підприємства швейного, хлібопекарського, кондитерського та молочного профілю [72].

З підприємств *чорної металургії* – виробництва чавуну, сталі і прокату, найбільш виразними ознаками відрізняється доменне виробництво, а також комбінати повного циклу. Зокрема, добре дешифрують самі доменні печі – за характерним хрестоподібним малюнком, димарям у кожної печі і кауперам (циліндровим баштам заввишки до 40 м і діаметром 6–8 м, в кількості не менше трьох на кожну піч). Обов'язкова наявність шлаковідвала (прямокутника чорного – майже чорного тону і тупикової залізничної вітки до нього), великих циліндрових споруд – газгольєрів або градирень, безліч залізничних під'їзних колій на території підприємства (рис. 5.138). Додаткові ознаки для виявлення доменного виробництва – його розташування відносно недалеко від збагачувального підприємства, кар'єрів вапняків і кварцевих пісків, з якими воно зв'язане залізничними та автомобільними дорогами, великого джерела водопостачання (водосховища), а також відокремлено від поселень. Обов'язковий також зв'язок металургійного підприємства з магістральною залізницею.

За аерофотознімками можуть бути віддешифровані і *коксові заводи*, які розташовуються найчастіше біля металургійних підприємств. Їхні головні ознаки – наявність димлячих труб, вузьких циліндрових споруд (вугільних і коксосушильных башт, складів силосного типу), розташованих невеликими групами, коксових

батарей (систем печей з характерним малюнком на зображенні), ємкостей для відходів.

У фотомалюнку *сталеплавильних* і *прокатних заводів* виділяють великі подовжені прямокутні будівлі цехів з димарями (у сталеплавильному виробництві мартенівським способом — це безліч розташованих поряд труб однакової висоти, в прокатному – окремі труби. Заводську територію прорізають під’їзні залізничні

*а*

*б*

*в*

*г*

Рис. 5.138. Металургійний комбінат (м. Маріуполь):
*а* – доменна піч, *б* – градирня, *в* – градирня на космознімку,
*г* – територія комбінату на космознімку
(доменні печі розташовані з лівого берега каналу).

шляхи. Будівлі прокатних цехів постають у вигляді систем злитих блоків, обов'язкова наявність відстійника.

Ознаки розміщення підприємств *кольорової металургії* багато в чому аналогічні тим, які описані для підприємств чорної металургії (у відношенні до сировинних джерел, поселень, джерел водопостачання, магістрального і під'їзного транспорту). *Мідеплавильні заводи* можуть бути виділені за наявності характерних будов власне мідеплавильного виробництва, що мають вид широких прямокутників сірого-темно-сірого фототону з темнішими і симетрично розташованими в площині дахів точками градирень, а також за високим димарем та шлаковідвалом – витягнутому прямокутнику майже чорного тону, за безліччю під'їзних залізничних шляхів.

*Глиноземні заводи* (первинна стадія виробництва алюмінію інтерпретують за наявністю трубчастих печей, зовні схожих з основними виробничими спорудами цементних заводів (див. нижче). При роботі глиноземних заводів на бокситовій сировині в струк-

Рис. 5.139. Завод з виробництва алюмінію (м. Братськ, Росія).

турі їхнього зображення можна бачити шламовідвали; заводи на нефеліновій сировині супроводжуються виробництвом цементу (ознаки інтерпретації див. далі). Власне алюмінієве виробництво інтерпретують за довгими вузькими прямокутникам сірого і світло-сірого фототону – будовам електролізних цехів (рис. 5.139).

Підприємства *хімічної промисловості* досить добре пізнають на аерофотознімках і великомасштабних космознімках за галузевою приналежністю, але важко диференціюють за спеціалізацією. Виняток становлять підприємства нафтопереробки і нафтохімії, специфічний малюнок яких, створюють безліч резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів (системи округлих світлих і сірих споруд, що підкреслюються тінями), велика кількість труб різного діаметру в горизонтальному положенні (світлих і сірих ламаних ліній). Важливими інтерпретаційними ознаками нафтопереробних підприємств служать: примикання до магістрального нафтопроводу, наявність нафтопасток (відстійників у формі прямокутників чорного тону), факелів спалювання газу (димових шлейфів), під'їзних шляхів та інших споруд. Для нафтохімічних підприємств характерні високі труби (дешифрують за довгими

Рис. 5.140. Надвірнянський нафтопереробний завод на Івано-Франківщині.

вузькими тінями і димовими шлейфами), наявність ємкостей у формі градирень (світлих плям округлої форми, що підкреслені тінями) (рис. 5.140).

Підприємства основної хімії – виробництво сірчаної кислоти, соди, мінеральних добрив тощо, – не дають на знімках характерних малюнків.

Більш виразно дешифрують на знімках *підприємства промисловості будівельних матеріалів*. Характерні ознаки цементних заводів – розміщені горизонтально (з невеликим ухилом) циліндри завдовжки до 200 м з високими димлячими трубами (обпалювальні печі, що обертаються), кулясті конструкції, що підкреслюються тінню (кульові млини), наявність недалеко вапняних кар'єрів (яскравий білий фототон), пов'язаних із заводом під'їзними залізничними і автодорожніми шляхами. На території навколо підприємств і кар'єрів є білястий наліт вапняного або цементного пилу, що виражається на знімках білуватим фототоном. Цементні заводи, зазвичай, знаходяться поза великими поселеннями, зв'язок з якими здійснюється по хорошій автодорозі, можлива наявність обслуговуючого призаводського селища (при значному віддаленні заводу від міста). Заводи по виробництву будівельної цегли демаскують на знімках довгі паралельні ряди сушильних сараїв, кожен з яких зображається у вигляді витягнутого прямокутника світло-сірого або сірого тону, а також зв'язок заводу з глиняним кар'єром по вузькоколійній залізній, автомобільній або ґрунтовій дорозі.

*Машинобудівні і електротехнічні заводи* на знімках постають у вигляді комплексів великих компактно розташованих будов (прямокутників) з характерним ребристим малюнком дахів. Території таких підприємств менш розчленовані транспортними лініями на відміну від територій підприємств описаних вище галузей. Виділити якісь особливі риси, характерні тільки для машинобудівного виробництва, важко.

Виняток серед даної групи підприємств становлять *суднобудівельні* і *судоремонтні заводи*, яким властивий набір специфічних ознак. Це – розміщення на берегах рік, озер, морів, прямокутні доки і корпуси суден, що будуються, на стапелях, наявність суден у причалів, які стоять в очікуванні ремонту, велика кількість підйомних кранів (на знімках великого масштабу пізнають за характерними

тінями), вузьких довгих складських приміщень, під'їзних залізничних шляхів уздовж берега. Певні труднощі викликає розмежування суднобудівельних (судоремонтних) заводів і споруд портового господарства, по відношенню до яких перші розташовуються, як правило, достатньо близько.

Підприємства *легкої і харчової промисловості* розміщені повсюдно. Дрібні і навіть середні підприємства такого роду, коли вони розташовані в зонах забудови, не завжди можуть бути навіть ідентифіковані як промислові підприємства. У текстильній промисловості на знімках чітко виділяють бавовноочищувальні заводи: майданчики для сушки бавовни відображені у вигляді системи прямокутників білого тону, території навколо заводів мають білуватий фототон, як наслідок розвівання бавовняної маси.

У харчовій промисловості деякими індивідуальними рисами відрізняються цукрові заводи. Вони часто розташовані поблизу природних або штучних водоймищ в районах концентрації бурякових плантацій, зв'язані автодорогами з господарствами-постачальниками сировини. Із залученням аерофотознімків можуть бути віддешифровані заводські труби, сховища жому тощо.

Підприємства м'ясної промисловості (м'ясокомбінати) можуть бути виділені за наявністю кошар і багатоповерховим виробничим будівлям (рис. 5.141). Рибопереробні підприємства дешиф-

Рис. 5.141. М'ясокомбінат на Тернопільщині.

рують за розташуванням на берегах водоймищ, риболовецькими суднами біля пірсів, мозаїкою складських, допоміжних і транспортних об'єктів. За аерофотознімками і великомасштабними космознімками інтерпретують підйомні крани, стрічкові транспортери (для вивантаження і транспортування риби) тощо.

*Складські приміщення* як частина промислових підприємств або самостійні ланки господарських систем виділяються за характерними витягнутими одно- чи двоповерховими будовами прямокутної форми світлого і сірого тону (тіні, як правило, відсутні), що контрастують з оточенням.

*Звалища побутового і промислового сміття* розташовуються найчастіше за межами населених місць, зв'язані з ними хорошими автодорогами (зазвичай є асфальтований з'їзд з дороги). На знімках вони мають хаотичний малюнок з нерівним сірим фототоном, форма в плані невизначена, хоча чітко обмежена, часто простежується приуроченность до понижень місцевості, ерозійних форм рельєфу. *Промислові відстійники* дешифрують за світлим фототоном вод, що заповнюють природні і штучні пониження в рельєфі (прямо- і багатокутники, обмежені лініями гребель), причому ступінь освітлення фототону буває різним в межах одного водоймища. Можливий і темний фототон відстійників. *Очисні споруди міських каналізаційних систем* зображені на знімках у вигляді мережі ділянок квадратної або прямокутної форми сірого фототону – відстійників, а за відсутності останніх – темними дельтовидними плямами у вигляді конусів винесення. Водоочисні споруди інтерпретують за характерним малюнком споруд, що нагадує в плані циферблат (цистерни для попереднього відстоювання), а також системою темних прямокутників – очисних басейнів.

***Транспортні об'єкти і системи***

Прямі дешифрувальні ознаки *залізниць* – прямолінійність значних за протяжністю відрізків, плавність і закругленість поворотів, чітко виражена постійна ширина на значних відрізках траси, наявність роз'їздів, проміжних і сортувальних станцій, великого числа виїмок, насипів (темніші смужки поблизу колії), перетин з іншими типами магістралей без з'єднання з ними (рис. 5.142). Траси залізниць добре підкреслюють на знімках смуги відчуження, що різко відмежовують з різних сторін від дороги ліс, ріллю та інші

*а*

*б*

Рис. 5.142. Залізничні колії:
*а* – на півдні м. Дніпропетровська, що повторює звивини ріки;
*б* – поблизу м. Житомира. Білою лінією виділені автомагістралі.

угіддя. Залізничні станції інтерпретують за лінійно-смугастою текстурою, елементи якої сходяться з обидвох сторін від станції.

*Для автомобільних доріг* характерні достатньо круті повороти, помітна крутизна підйомів і спусків, різні кути з'єднання (зокрема прямі) з іншими дорогами. Автостради і шосейні дороги вирізняють чіткі контури, постійна і порівняно велика ширина, протяжні прямолінійні ділянки, виразні смуги відчуження більшої ширини, ніж у залізниць (див. рис. 5.142). *Ґрунтові дороги* виділяються на знімках звивистими контурами, розгалуженістю, непостійністю ширини, роз'їздженістю (наявністю об'їздів і роздвоєнь), перетином невеликих перешкод (ярів, неглибоких річок) без насипів і мостів. *Польові і лісові дороги* з сезонним або епізодичним рухом зображаються на знімках тонкими лініями, які закінчуються в полях або в лісі. На знімках аридних районів інтерпретують скотопрогінні і караванні шляхи як смуги світло-сірого тону з нечіткими межами, які сполучають ще світліші, достатньо великі плями – ділянки повністю знищеної рослинності в місцях водопою.

*Водні шляхи сполучення* встановлюють шляхом прямого виявлення на дистанційних матеріалах суден, портів, пристаней та інших спеціальних споруд, які обслуговують річковий і морський

Рис. 5.143. Морський порт м. Одеси.

транспорт (рис. 5.143). Порти пізнають за пристанями, причалами, молами – вузькими світлими смужками, що вдаються в акваторію, великій кількості складських приміщень на березі, залізничним під'їзним коліям до причалів. Великі морські і річкові порти мають в своєму розпорядженні затони – зимові стоянки суден. Морські порти розташовані в природних бухтах, часто відгороджених від моря хвилерізами і молами. На аерофото- і космічних знімках дешифрують і підйомні крани – характерні об'єкти вантажних портів.

*Меліоративні канали* відрізняються на знімках від річок однаковою шириною русла і чіткою прямолінійністю, темна смуга води на знімках контрастує зі світлими смугами брустверів. Мережа каналів утворює лінійну текстуру зображення.

*Аеропорти* пізнають за малюнком злітно-посадових смуг (часто у формі літери "Т" з подовженою "щаблиною", хоча не в усіх випадках) та місцями стоянки літаків. Під час значного збільшення дешифрують різної величини літаки та вертольоти. Злітна смуга має чіткі контури і яскравий світлий фототон (рис. 5.144.).

Інтерпретація *ліній електропередач* у великій мірі залежить від району досліджень. На знімках лісових районів ці об'єкти дешифрують за світлою, дещо розмитою і достатньо широкою смугою з різкими поворотами, що перетинає контури інших об'єктів. У таких випадках їх демаскують супутні просіки, що не мають постійної ширини і що не узгоджуються з системою лісовпорядних просік. На знімках гірських районів сформований специфічний малюнок за рахунок ланцюжків світлих плямочок (майданчиків під опорами). На рівнинних сільськогосподарських землях лінії електропередачі можуть бути пізнані за тінями від опор (рис. 5.145). Розташовані в створах ліній прямокутники сірого тону, від яких, у свою чергу, розходяться у різних напрямах тонші лінії, що простежуються на знімках, – це великі електропідстанції.

***Сільськогосподарські об'єкти і системи***

Об'єкти сільськогосподарського призначення мають широке розповсюдження і безпосередньо пов'язані з природними умовами території, що впливає на методику інтерпретації.

*Орні угіддя* дешифрують за формою і характером меж угідь, а також за фототоном. Масиви ріллі створюють на знімках різнотональну мозаїку прямокутних, багатокутних, іноді округлих,

*а*

*б*

Рис. 5.144. Вигляд аеропортів на космознімках:
*а* – м. Івано-Франківська (нові смуги примикають до Т-подібної),
*б* – Харкова.

Рис. 5.145. Високовольтна лінія електропередач на космознімку надвисокої роздільної здатності(зображення опор у великій мірі передають їхні тіні на полях).

комірок з чіткими межами (рис. 5.146). Фототон комірок варіює від світло-сірого до чорного залежно від сезонного агростану полів. На достовірність виділення масивів орних земель впливає їхнє сусідство з іншими видами угідь – вельми контрастні межі ріллі і лісу, менш контрастні межі ріллі і пасовищ (особливо при тональній близькості обох об'єктів на зображенні). Надійність інтерпретації орних земель залежить і від часу зйомки. Для сухостепових районів краще використовувати літні знімки, для лісостепових і степових – осінні, коли масиви зябу контрастують з лугами і пасовищами. У степових рівнинних районах ділянки ріллі мають, як правило, великі розміри і прямокутну чи квадратну правильну нарізку.

Із збільшенням розчленованості рельєфу нерегулярність нарізки зростає, поля набувають неправильної форми, їхній розмір зменшується (рис. 5.147). У лісовій зоні дрібні ділянки ріллі вкраплені в масиви угідь інших видів. У гірських районах орні

Рис. 5.146. Угіддя переважно квадратних і округлих форм на Причорноморській низовині (Миколаївська обл.). Присадибні ділянки дрібносмужкових форм. Лінією темного фототону зображений Інгулецький зрошувальний канал.

угіддя приурочені до долин великих рік та узгір'їв. Вони невеликі за площею, неправильної форми, з нечіткими межами, нерідко повторюють форми пологих схилів. При контурній нарізці полів, вони набувають плавніших обрисів, їхні межі ніби наслідують горизонталі.

*Зрошувана рілля та осушувані угіддя* мають на знімках особливі ознаки інтерпретації. Це, в першу чергу, темніший фототон зображення, обумовлений підвищеною вологістю ґрунту. Форма полів тут повторює будову і планову структуру зрошувальних (дренажних) мереж і залежить від виду зрошення (осушення). Для цих районів характерна переважно правильна прямокутна нарізка полів, які творять смугасту текстуру зображення на дрібномасштабних знімках. Характерне також розташування полів в «ялиночку», де останні ніби нанизані на темні нитки проміжних каналів під гострим кутом до магістрального. Своєрідною округлою формою виділяються поля, зрошувані циркулярними

*а*

*б*

Рис. 5.147. Поля багатокутних форм:
*а* – на Придніпровській височині в районі м. Києва,
*б* – на Харківщині (стрілки показують межі на брівці яру).

дощувальними установками (радіальної сфери дії) (див. рис. 4.4, 5.10.18.).

Багаторічні насадження – *ягідники, виноградники, сади, плантації чаю* тощо, розпізнають на знімках під час детального огляду. Масиви насаджень дешифрують завдяки квартальній нарізці ділянок і характерній текстурі зображення – крапчасто-смугастій садів, плантацій чаю, виноградників (з меншою "стрічкою", ніж у садів) (рис. 5.148).

Різнотонними смугами і витягнутими вузькими смужками відображені на знімках *городи* (*присадибні ділянки*) (див. рис. 5.10.17). Вони найчастіше розташовані біля сільської забудови і є її індикаторами, оскільки одноповерхову забудову через малі форми слабо розпізнають на знімках. Зустрічаються городи також серед фермерських і колгоспних полів окремо від забудови.

*Природні кормові угіддя* мають, як правило, неправильні плавні контури. Їх фототон сильно варіює залежно від стану і продуктивності, а також часу і параметрів знімань. Кормові угіддя без кущів відрізняються рівним однорідним, рідше плямистим малюнком зображення. Пасовищам із кущами і одинокими де-

Рис. 5.148. Сади (вверху знімка) і виноградники (внизу і по центрі) на Закарпатті поблизу м. Хуст.

ревами властивий специфічний точковий малюнок. Непрямою ознакою переважаючого виду використання кормових угідь може служити їхнє місцеположення: сіножаті найчастіше займають заплави і надзаплавні тераси річкових долин, пасовища у лісовій зоні розташовані на лісових галявинах чи поблизу лісових масивів, іноді у долинах малих рік, в лісостеповій і степовій зонах приурочені до балок або покатих схилів пагорбів, а в зоні пустель і напівпустель займають вододільні простори. Білуваті фототони на ділянках угідь свідчать про збитість пасовищ, еродованість або солонцюватість.

Окремі *тваринницькі ферми* відображені на знімках вузькими видовженими дуже світлими, майже білими, смужками. Тваринницькі чи птахівницькі комплекси є поєднанням таких смужок, розташованих рядами. Розташовані тваринницькі ферми зазвичай на околицях або поблизу сільських поселень, з якими їх зв'язує хороша автодорога.

На основі фізіономічних особливостей фотозображення тваринницьких комплексів на знімках великої роздільної здатності роблять припущення про напрям їхньої спеціалізації. У структурі зображення молочних ферм є характерна деталь, яка демаскує такі комплекси, – доїльний блок у формі відростка, що відходить від середини прямокутника будівлі ферми, або що сполучає дві сусідні будівлі (у формі букви "Н"). У структурі зображення відгодівельних комплексів великої рогатої худоби такого елементу немає. Великі свинарські ферми зазвичай утворюють секції, частіше з чотирьох близько розташованих витягнутих будов – що створює ефект опуклості. Птахофабрики з виробництва курей схожі з відгодівельними комплексами, але відстані між виробничими блоками менші, оскільки тут відсутні вигульні двори. Наявність водоймищ дає можливість припустити спеціалізацію птахофабрик на вирощуванні водоплавних птахів.

На даний час більшість тваринницьких ферм не використовують, вони занедбані і в різній мірі зруйновані.

Фотомалюнок *тепличних господарств* визначає чергування довгих вузьких білих смуг (будівель). Вони розташовані, як правило, біля міських поселень.

За космознімками виявляють екзогенні процеси, які розвиваються на угіддях, що дає змогу оцінити ефективність здійснюваних

*а*

*б*

Рис. 5.149. Прояви екзогенних процесів на полях:
*а* – мікроулоговинна ерозійна мережа на Малому Поліссі, *б* – соляні блюдця і западини на Причорноморській низовині (показані стрілками).

агротехнічних заходів на полях. Ерозійні форми на полях виразно дешифрують за характерною (плавною) звивистістю, деревовидним малюнком, поступовим наростанням ширини, відсутністю перетинів. Їхні початкові форми – безрусельні улоговини і ділянки змиву ґрунту виявляють на знімках за системою світлих тонких смужок (рис. 5.149). Непряма ознака їхньої наявності – стан посівів сільгоспкультур (на таких ділянках фототон посівів також світліший). Головні ознаки засолення земель – світлий фототон і плямистість малюнка (мозаїка плям темних, світло-сірих і майже білих тонів), збитості і стравленості випасів – світлі або майже білі плями на підвищених елементах рельєфу, в периферійних зонах населених пунктів, світлий тон рослинності поблизу водоймищ.

***Житлова і соціально-культурна забудова***

Об'єкти і системи селитебного призначення різко відрізняються від промислових і сільськогосподарських за типом, розташуванням споруд, характером під'їзних шляхів і озелененням. Для них характерний, зазвичай, чіткіший геометричний малюнок, що складається з однотипних елементів і блоків відповідних будівель, розділених смугами вулиць.

*Одноповерхова індивідуальна забудова* садибного типу – переважаючий тип забудови сільських поселень та малих міст, часто зустрічається в середніх і навіть великих містах. Цей тип забудови упевнено дешифрують за крапчасто-комірковою структурою зображення. Елементами структури є великі крапки білуватого фототону – дахи будівель, і невеликої площі прямокутні однотипні форми темно-сірого-чорного фототону – присадибні ділянки. До будівель приурочені сади, які на знімках мають зернисту текстуру зображення темного фототону. Рядкове або блокове компонування забудови підкреслене світлими розділовими смугами (вулицями) (рис. 5.150). Крапкові зображення дахів будинків достатньо контрастні: кам'яним і цегляним будинкам, критим залізом, шифером або черепицею, властива вища контрастність порівняно з дерев'яними і глинобитними домами. Для нової садибної забудови характерна чіткість ліній вулиць, регулярна система кварталів, стандартні споруди, більш симетричне розташування будинків і менше озеленення в порівнянні із забудовою ранішого часу. Регіональні особливості та рельєф накладають певний відбиток на характер забудови і ступінь озеленення.

Рис. 5.150. Садибна (північний схід та центр космознімка) і багатоповерхова забудова (південний захід) м. Донецька.

*Малоповерхова щільна забудова* (1–3 поверхи) характерна, головним чином, для старих житлових районів міст. Густо розташовані малорозмірні об'єкти різної форми, що чергуються, білуватого фототону (дво- і триповерхові будинки), крапки такого ж тону (одноповерхові будинки) і темні зернисті плями та смуги рослинності (мають місце не завжди), зосереджені уздовж прямих вулиць – ниток світлого фототону, створюють строкатий контрастний малюнок на фотозображенні.

Зображення *багатоповерхової житлової забудови* складають здебільшого вузькі довгі прямокутники, іноді з'єднані між собою під прямим чи тупим кутом, розташовані на фоні зернистої текстури деревної рослинності. Площа зображення таких прямокутників, зазвичай, значно перевищує площу зображення дво- і триповерхових будинків. Тіні, які кидають будівлі, можуть бути більші або рівні ширині самого будинку. За довжиною тіні визначають поверховість будівель (рис. 5.151). На космознімках великої роздільної здатності видно також власні тіні домів.

Багатоповерхові будинки – основний вид забудови великих і середніх міст. Щільніше розташування об'єктів (квартальна за-

Рис. 5.151. Космознімок м. Києва.
В центрі знімка, півкругла будівля – Кабінет міністрів, у східній частині знімка, будівля з куполом – Верховна рада, поряд з північного сходу – Маріїнський палац. За тінями дешифрують малоповерхову забудову, у південно-східній частині знімка та в центрі (Кабінет міністрів) – багатоповерхову.

будова) у вигляді смуг будинків, що замикаються, уздовж вулиць характерне для старих частин міста; розріджена, вільно орієнтована забудова мікрорайонного типу відрізняє райони-новобудови. Останнє має місце також і в малих містах. У центральних районах таких міст багатоповерхова (щільніша) забудова представлена в основному уздовж головних вулиць міста, внутрішні частини кварталів нерідко забудовані малоповерховими будинками. Деревні насадження, що примикають до щільної багатоповерхової забудови уздовж вулиць, не завжди дозволяють побачити тіні і, отже, безперечно судити про поверховість забудови.

Території нового житлового будівництва мають на аерофото- і великомасштабних космічних знімках хаотичний (безладний) малюнок за рахунок недобудованих об'єктів, складів будматеріалів, зритої землі (котлованів, насипів), під'їзних шляхів.

*Громадські будівлі* дешифрують як великі об'єкти, що окремо стоять, – будинки своєрідної форми, часто у вигляді букв "П", "Н",

*а*

*б*

Рис. 5.152. Культові споруди на космознімку:
*а* – Софійський (справа від Собору довгу тінь кидає дзвіниця),
*б* – Володимирський собори у Києві.

"Т" тощо. В розпізнаванні таких об'єктів істотну роль відіграють непрямі дешифрувальні ознаки – наявність вільних територій перед спорудами (їхня відособленість), розташування в місцях сходження вулиць, в центрах кварталів, а також розташування мало- або багатоповерхової будівлі в масиві одноповерхової забудови, наявність сквера перед спорудою або зелених насаджень по всьому периметру тощо.

*Культові споруди (церкви, костьоли)* на знімках виявляють як громадські будівлі великих розмірів, розташовані в центрах поселень, на площах і підвищених місцях. На знімках їхня точна ідентифікація може бути здійснена за характерними контурами в плані, своєрідній формі падаючої тіні і орієнтації споруди (переважно зі сходу на захід) (рис. 5.152). Непрямою ознакою може служити наявність поряд з церквою кладовища, що дешифрують як парк або сквер (див. нижче). Схожі дешифрувальні ознаки мечетей, які виділяють за вузькими високими баштами – мінаретами, які кидають вузькі довгі тіні.

*Парки і сквери* з густою деревною рослинністю демаскують на знімках чіткі обриси форм, майже чорний фототон і характерний зернистий малюнок. Дешифрують головні алеї, окремі великі рекреаційні споруди. Сквери з рідкісною деревною рослинністю (з переважанням газонів, чагарників) зображені світло-сірим фототоном, в таких скверах добре видимі не масковані кронами

Рис. 5.153. Дачні ділянки на околиці м. Львів.

дерев алеї і пам'ятники. Останні інтерпретують як малорозмірні об'єкти, як правило, округлої форми, наявність тіні додає їм об'ємність.

*Спортивні споруди (стадіони, іподроми)* на знімках виявляють за характерною у формою еліпса, величиною у два-три міських квартали. В центрі еліпса – темного фототону поле, на периферії – світлого тону трибуни.

*Садово-дачні ділянки* інтерпретують за середньокомірковою текстурою із здебільшого квадратними комірками, в яких чергуються світло-сірого (будинки), сірого (рілля) і темно-сірого (дерева) фототону елементи (рис. 5.153). Від одноповерхової садибної забудови їх відрізняє помітне переважання темного тону рослинності, менший розмір і менша яскравість крапок-споруд.

## 5.11. Еколого-географічні аерокосмічні дослідження

Обумовимо, що еколого-географічними дослідженнями будемо вважати ті, які стосуються життя геосистем.

Як було зазначено в попередніх підрозділах, майже всі галузі географічних наук не обходяться без використання матеріалів дистанційного зондування Землі. Ці галузі задіяні також в еколого-географічних дослідженнях, бо саме географія найбільш комплексно може розглядати проблеми життя геосистем. Для вирішення еколого-географічних проблем необхідними є не тільки географічні, а й геологічні, біологічні та інші просторово-територіальні дослідження (наприклад теплобалансові, воднобалансові, газообмінні в атмосфері, льодах та океанах). Важливо, щоб дослідженнями були охоплені різномасштабні об'єкти – місцеві, регіональні і глобальні, а також щоб такі дослідження були синхронними. Отже, аерокосмічні методи в еколого-географічних дослідженнях не тільки можливі, а й обов'язкові, вони тут незамінні і єдині, бо можуть забезпечити поставлені умови масштабності та синхронності.

Разом з тим, еколого-географічні проблеми стосуються найрізноманітніших сфер життя в геосистемах: біологічного з його надзвичайною різноманітністю – рослинного, тваринного, мікробного

та іншого; суспільного, а також небіологічного – астрономічного, геологічного, гідрологічного, геофізичного, геохімічного з усіма їхніми формаціями, полями, речовинно-енергетичними взаємообмінами. В екологічному відношенні практично не має значення форма життя. Важливим є *спосіб життя* – як певні послідовності функціонування самоорганізованих систем (сценарії, правила, етологія) та *умови (еко)*, якими це життя супроводжується, забезпечується, підтримується чи гаситься ради перетворення на нове життя – самоорганізується, бо "живі живуть для живих і помирають також для живих". Цим правилом додатково поглиблюється та розширюється складність геоекосистем, бо підключається їхній історично-генетичний аспект, вплив сусідства.

Тим не менше, ради вивчення геосистем слід штучно відокремити[22] одну систему від іншої. У якій мірі відбиватиме об'єктивні реалії життя геосистеми її штучне виділення – залежить від дослідника та від методів, обраних для дослідження. Маємо переконання, що саме аерокосмічні методи з їхньою синхронною різномасштабністю, при умові подальшого розвитку, зможуть забезпечити найбільшу повноту і деталізацію дослідження геосистем. В цьому переконують вже наявні досягнення та тенденції їхнього розвитку.

Зазначимо також, що еколого-географічних проблем є настільки багато, а їхніх дослідників з належним забезпеченням так мало, що їхнє вирішення стає прерогативою вибору проблем самих дослідників. Безперечно, існують міжнародні програми з вивчення екологічних проблем, які реалізують спеціальні наукові колективи. Проте головна маса вчених розпорошена по науково-дослідних інститутах і навчальних закладах, які працюють за своїми планами та бюджетами, і лише іноді можуть "вписатися" у виконання дослідницьких програм з використанням методів ДЗЗ. Тому вважаємо, що час реального вирішення еколого-географічних проблем ще не настав. Тільки тоді, коли для людського суспільства ці проблеми стануть реальною щоденною загрозою, буде включено весь можливий потенціал науковців і наукових інституцій. Сьогодні людство розуміє можливі екологічні проблеми

[22] У випадку "відокремлення" геосистема перестає бути такою, бо вона виявляється штучно відірваною від її системоформуючих зв'язків.

для себе, як частини природи, готується до їхнього вирішення, в тому числі, нагромаджуючи фундаментальні моніторингові дані та розвиваючи аерокосмічні методи досліджень.

Серед еколого-географічних проблем виділяємо дві важливі групи:

а) проблеми спонтанного розвитку природного середовища;

б) проблеми, породжені безпосередньою діяльністю людини або спровоковані нею.

Всі формації в природі перебувають в динамічній рівновазі. Природні процеси є закономірними, доцільними для кожної природної ситуації, для закономірного саморозвитку природи. Все в природі відбувається закономірно, за природними законами розвитку, за причинно-наслідковими зв'язками. Так природні процеси саморегулюються і врегульовуються вже мільярди років.

Інший аспект – людська оцінка – правильний, чи неправильний цей процес з позицій оцінювання чи вигоди людини. Більше того: людина сама є тією дійовою особою, яка виокремлює проблему, оцінює її як проблему, формує її дефініцію, вирішує шляхи і методи її подолання. А тому всі природні проблеми, є проблемами, виділеними і названими людиною. Більше того, проблеми створені людиною для природи, також не є проблемою – її природа внормує шляхом реакції на вплив людини. Чи ця реакція буде вигідною для людини, чи призведе до погіршення екологічної ситуації самої людини, чи, навіть, до її знищення – це вже справа правил та закономірностей розвитку природи. Тому людина повинна відслідковувати свій вплив, виявляти тенденції свого впливу і працювати з метою недопущення розвитку небажаних явищ.

Назвемо загальновідомі і відчутні впливи людини на розвиток природи:

1. Забруднення природного середовища;
2. Зміна структури рослинного покриву природних зон;
3. Зміна гідрологічного режиму водних артерій суші, осушення боліт;
4. Зростання міст, сіл і комунікацій;
5. Зміна стану озонового шару;
6. Насиченість життєвого простору ЕМХ антропогенної генерації;

7. Ксерофікація суходолу і розширення пустель;
8. Парниковий ефект;
9. Скорочення льодовикових щитів;
10. Глобальна зміна клімату.

До цього списку можна додати ще вичерпування природних ресурсів корисних копалин, зникнення видів природних організмів, втрата біорізноманітності, трансформація ландшафтної різноманітності, втрата ґрунтами гумусу, зниження родючості, пришвидшення росту чисельності людського населення Землі (перенаселення), скорочення комфортного життєвого простору тощо. Показовим є вплив людини на переселення рослин (галінзога), тварин (кролики в Австралії), комах (колорадський жук) з їхнім надмірним розмноженням, чи мікроорганізмів (фітофтора) з їхніми хворобоносними діями (грип, туберкульоз, ВІЛ, СНІД). Безперечно, це проблеми і їх потрібно вирішувати.

При цій констатації звернемо увагу на правило І. Канта, в якому він твердить, що явище, яке зародилось і розвинулось внаслідок дії певних правил та законів при збереженні цих законів неминуче призведе до старіння, а потім і до руйнації цього явища. Отже, людство не може дозволити собі розкіш життя за стилем консумента[23], та ще й найактивнішого. Людство мусить дбати про своє екологічне середовище, причому в глобальному масштабі. Повинні виробляти правила, заповіді, табу для співжиття між людьми, колективами, адміністративними одиницями в державах і між державами, яких порушувати не дозволено. Інакше – кривди, біди, катастрофи, війни, самознищення.

У зв'язку з цим наростає проблема *моніторингу*: глобального, регіонального, локального. Разом з тим виникає проблема доступу до моніторингових результатів, їхнього аналізу та вироблення адекватних рішень. Кому належатиме ця роль?

В цій ситуації знову виходять на перше місце методи дистанційного зондування Землі і доступ до їхніх результатів. "Хто володітиме інформацією, той володітиме світом". М'якше звучить перефразоване нами: "Хто володітиме інформацією, той зможе бути захищеним".

---

[23] Консумент – споживач товарів та послуг.

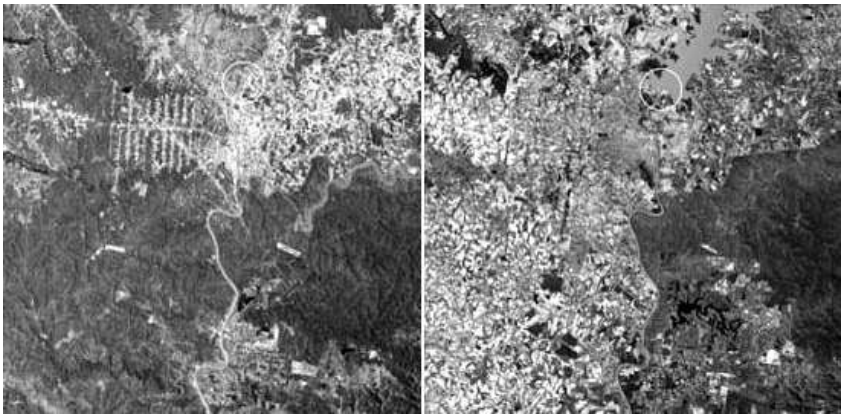
Космічні засоби збору інформації на даний час є досить універсальними. Однак, їхнє використання для налагодження глобального моніторингу є ще досить обмеженим і доступним тільки для держав та державних об'єднань, які мають розвинуті відповідні космічні технології.

Сьогодні за допомогою космічних методів вирішують безліч часткових проблем природокористування та складають бази даних для їхнього ймовірного використання в майбутньому. Про можливість дослідження природних та соціально-економічних систем у різних аспектах написано в попередніх розділах. В цьому підрозділі розглянемо лише комплексні природоохоронні дослідження.

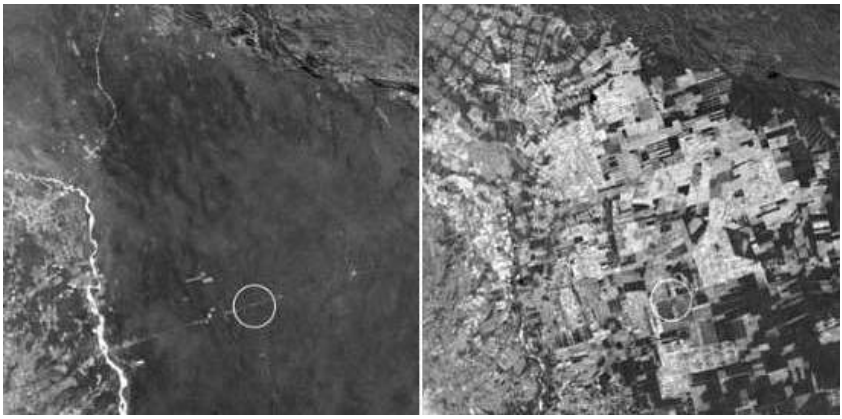
***Антропогенізація природних ландшафтів***

В наш час практично всі ландшафти зазнали прямих чи опосередкованих антропогенних змін і створили додаткове їхнє урізноманітнення, виходячи зі способу їхнього господарського використання. Це сільськогосподарські, лісогосподарські, промислові, поселенські, транспортні, військові перетворення. Дослідження таких ландшафтів вимагає передусім їхнього виявлення, обліку, визначення класу їхньої трансформованості. Для цього з використанням матеріалів дистанційного знімання виконують дешифрування змінених територій для оновлення топографічних і кадастрових карт та подальшою інтерпретацією результатів їхнього дослідження (рис. 5.154). Роздільна здатність сучасних карт (розмір можливого розпізнавання об'єктів становить більше одного метра) дозволяє легко дешифрувати об'єкти малих розмірів такі, як будівлі, окремі дерева, дороги, канали, а також зміни в контурах угідь, площ забудованих територій, затоплених територій, вирубаних лісів, вигорілих лісів та інші об'єкти. В цьому випадку важливим є змога дешифрувати забруднені території, зокрема картографувати площі, покриті димами та іншими факелами викидів в атмосферу (гази металоплавильних виробництв, продукти горіння на теплових електростанціях, пил цементних заводів тощо) (рис. 5.155).

*В димових факелах* можна дешифрувати концентрацію частинок, радіус їхнього розсіювання при різних швидкостях вітру, а також сектор найчастішого осідання викидів. Звичайно, названі параметри дуже залежать від метеорологічної ситуації, висоти



1973 2003



1975 2003

Рис. 5.154. Зростання площ сільськогосподарських угідь на місці вирубаних тропічних лісів у Болівії протягом 30-річного періоду [148].

димарів, стратифікації приземних шарів атмосфери, турбулентних чи ламінарних процесів у зоні формування факелів. Власне й сама форма факелів дає змогу опосередковано трактувати приземну метеорологічну ситуацію. Так, в разі наявності стійкої стратифікації в приземних шарах атмосфери, вітрі до чотирьох балів, відсутній турбулентності факели мають чітко виражену лінійно-струменеву форму з малим кутом розширення. Під час

Рис. 5.155. Антропогенно-перетворена поверхня Криворізького залізорудного басейну. Справа видна задимленість повітряного середовища.

більших швидкостях вітру і добре вираженій турбулентності спостерігають пульсуючі та дифузні форми факелів (рис. 5.156).

*Загальне забруднення повітря над містами* на космознімках виглядає як сіра вуаль чи темна пляма. Чим більше забруднення міст, тим щільнішою стає темна пляма над містами і тим гірше відчитують структуру вулиць та кварталів міст. Своєрідним індикатором забруднення міст і транспортних магістралей стало пошкодження листя дерев у парках, а також вздовж залізничних та автомобільних шляхів. Особливо добре такі факти дешифрують під час багатозонального знімання і спектрозонального знімання в оранжевих, червоних та інфрачервоних хвилях.

За знімками виявляють *забруднення вод промисловими викидами* чи природним замуленням внаслідок зливових опадів. Прозорі води в синьо-зеленій ділянці спектру ЕМХ можуть проглядатися до глибини 30 м. Під час зростання концентрації забруднень

Рис. 5.156. Димлячі градирні Рівненської АЕС у м. Кузнецовську.

оптична яскравість вод збільшується, а інтенсивність випромінювання (яскравість) зміщується в бік довших хвиль.

*Біологічне забруднення вод* пов’язане зі заростанням водойм водоростями чи, навіть, з формуванням сплавини. Ступінь “цвітіння” вод чи густину приґрунтових водоростей визначають за співвідношенням концентрації хлорофілу в зелених та синіх хвилях. Із збільшенням концентрації водоростей хлорофільний коефіцієнт підвищений (рис. 5.157).

*Хімічне забруднення вод* (наприклад нафтовими плямами) дешифрують за спектральним і кутовим розподілом оптичних характеристик. У коротких хвилях (фіолетових і синіх) нафтові плями відбивають значно більше світла, ніж чиста вода. Однак, нема прямої залежності між інтенсивністю нафтового забруднення і відбивною здатністю води, бо в це співвідношення “втручається” товщина нафтової плівки, її температура, хвилювання поверхні води, позиційне співвідношення Сонця, нафтової плями та апаратури знімання. Під час невеликих змін цих позицій нафтова пляма може давати дзеркальну чи зустрічно спрямовану індикатрису відбиття. Додатковим, побічним ефектом для дешиф-

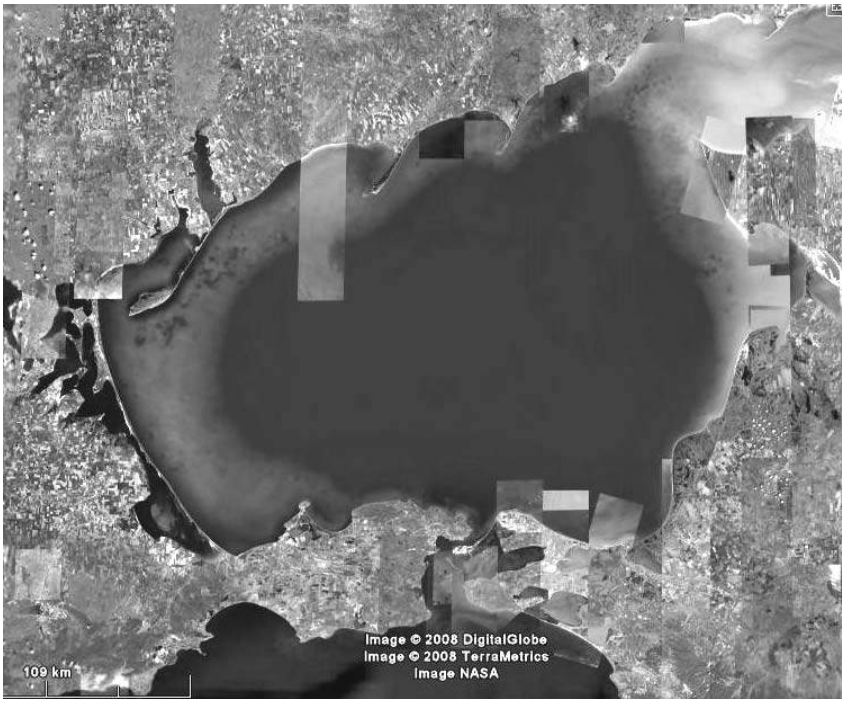



Рис. 5.157. "Цвітіння" води біля берегів Азовського моря.

рування нафтових та масляних плям на воді може бути зменшене хвилювання в межах поширення плям.

Дію людини на ґрунтовий покрив (водна ерозія, вітрова дефляція, вторинне засолення) розпізнають, в основному, за непрямими ознаками.

*Наявність лінійної водної ерозії* на території дешифрують за вираженим дендритовим рисунком, який є характерним для територій, де наявний поверхневий стік. Специфікою космічних знімків є те, що лінійні форми об'єктів можуть бути видними на знімках навіть тоді, коли їхня ширина є меншою від показника роздільної здатності для цього виду знімання. Це стосується доріг, каналів, потічків, а отже і змінених тимчасовими (післядощовими) струмками поверхонь. Дуже добре лінійні ерозійні форми читають на полях без високої та густої рослинності, гірше на полях з рослинністю, однак їх видно навіть на луках та пасовищах, якщо

Рис. 5.158. Мережа ярів на Середньоруській височині у Харківській області.

на них формується лінійна ерозія. Додатковими ознаками давніх лінійних ерозійних форм служать світлові тіні видолинків, схилів лощин, вираженість їхніх днищ, наявність ділянок з акумуляцією матеріалу твердого стоку, розмитих шлейфів чи сформованих конусів виносу (рис. 5.158).

*Наявність площинної водної ерозії* можна констатувати за характерною плямистістю хвилястих поверхонь (див. рис. 5.147 *а*). Плями виникають через зміну гумусованості та винесення мулистих частинок краплями води при активізації площинної ерозії. При цьому винесення відбувається на частинах схилів з пришвидшеним рухом крапель і ці частини схилів стають світлішими. Проте під час площинного змиву транспортування вимитих часток відбувається на короткі віддалі, а тому поруч із ділянками активнішого площинного змиву наявні ділянки площинного стоку, де нема виносу, та ділянки акумуляції перенесеного матеріалу. Ці ділянки зображаються темнішими фототонами. Таким чином, поля з площинним змивом є плямистими, але трудність дешифрування полягає в оцінці інтенсивності ерозійних та акумулятивних процесів на кожній з виявлених плям.

*Вітрову ерозію* дешифрують за слідами цього процесу та за зображеннями пилових бур. Перенесення пилу під час сильних вітрів зображається подібно до димових покрить при лісових пожежах. Вітрове роздування – дефляція, також має певну локалізованість. Вона розпочинається лише на тих ділянках, де ґрунт не захищений рослинністю, структурні окремості ґрунту втратили взаємне зчеплення і розпадаються (від пересушення, втрати гумусу чи інших клейких інгредієнтів). На цих ділянках вітер набирає швидкості, достатньої для транспортування ґрунтових частинок, сам вітер створює відповідний нанорельєф (своєрідні котловини видування, "заструги", хвилі, валики та мікроуступи[24]), сприятливий для своєї діяльності. Названі умови мають велику просторову мінливість, а тому прояви вітрової ерозії також є просторово диференційованими і можуть проявлятися на просторих рівнинних та відносно сухих територіях (рис. 5.159). Тому дешифрування вітрової ерозії виконують переважно там, де вона може проявлятися.

На знімках поля з проявами вітрової ерозії виглядають світлішими, зі світлими плямами факельних форм без виразних границь в кінці плями за напрямом вітру. Важливою дешифрувальною ознакою прояву вітрової ерозії служать темні акумулятивні шлейфи дрібнозему в місцях можливого зменшення швидкості вітру та у вітрових тінях: за горбами, лісопосадками, окремими деревами чи кущами, спеціально облаштованими "кулісами" – вузькими смугами рядів кукурудзи чи інших високих рослин, вітрозахисних щитів, поставлених поперек напряму суховійних вітрів.

Зазначимо, що прояви природної та синантропної вітрової ерозії важко розрізнити за наслідками, однак можна відчитати за місцем її початку – зазвичай, це сільськогосподарські поля з недотриманими протидефляційними технологіями.

Вітрову діяльність на територіях з еоловими формами (в піщаних пустелях) дешифрують власне за цими формами.

Одним із найпоширеніших пошкоджень антропогенного характеру є *згарища на місці лісів* і трав'яної рослинності. Пожежі можуть виникати також природним шляхом (від удару блискавки), але вони супроводжуються дощем і часто природно гасяться.

---

[24] Всі ці мікроформи можна спостерігати на снігу після зимових вітрів без випадання нового снігу.

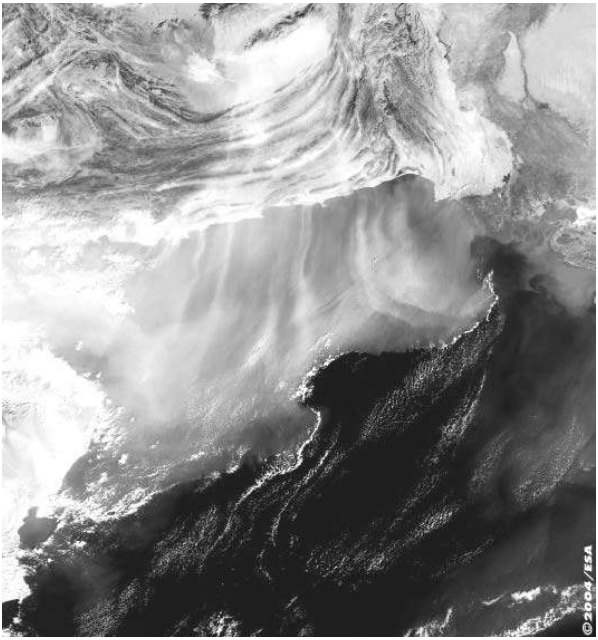



Рис. 5.159. Пилова буря в Пакистані.
Вітер відносить пил далеко в море.

Антропогенні пожежі практично завжди набирають загрозливого розвитку і супроводжуються втратою ресурсів, матеріальних цінностей та забрудненням атмосфери.

На знімках, зроблених під час пожежі, добре видно шлейфи димів, через що легко віднаходити місце загоряння (рис. 5.160). Однак, димовий шлейф при нестійкому вітрі може також приховувати місце пожежі.

Згарища розпізнають на знімках за темним фототоном, який спричинюють обвуглені рештки рослинності. На знімках, зроблених зимою, дозимові згарища можуть виглядати світлими плямами через незатінений рослинністю сніговий покрив (як і на лісосіках). Характерно, що плями згарищ мають смугасто-клиноподібну форму з виразними границями. Простягання цих смуг і клинів збігається з напрямом вітру під час пожежі.

За знімками можна класифікувати згарища за віком, враховуючи його трансформацію новою рослинністю. З часом згарища

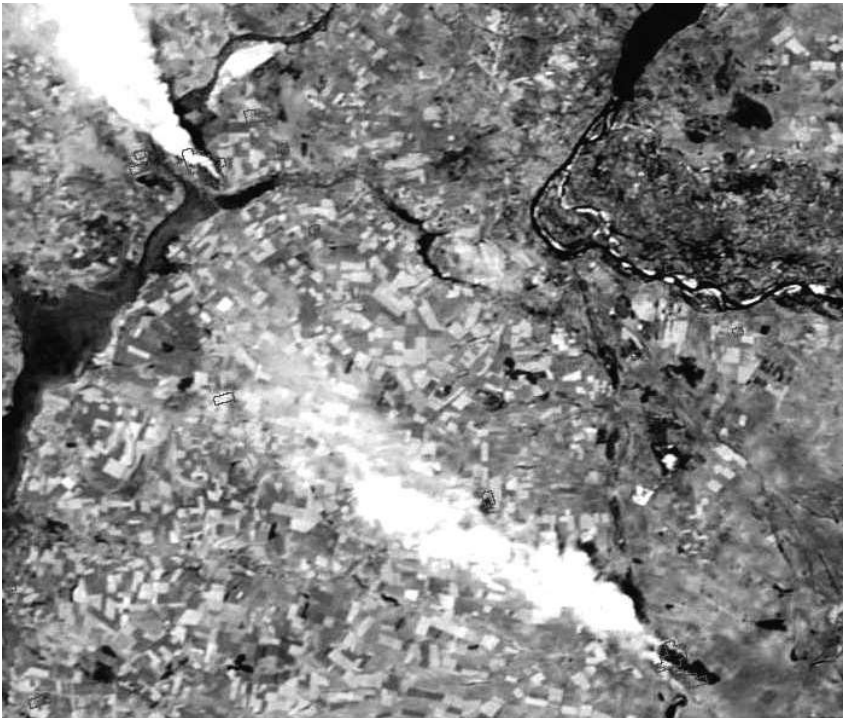
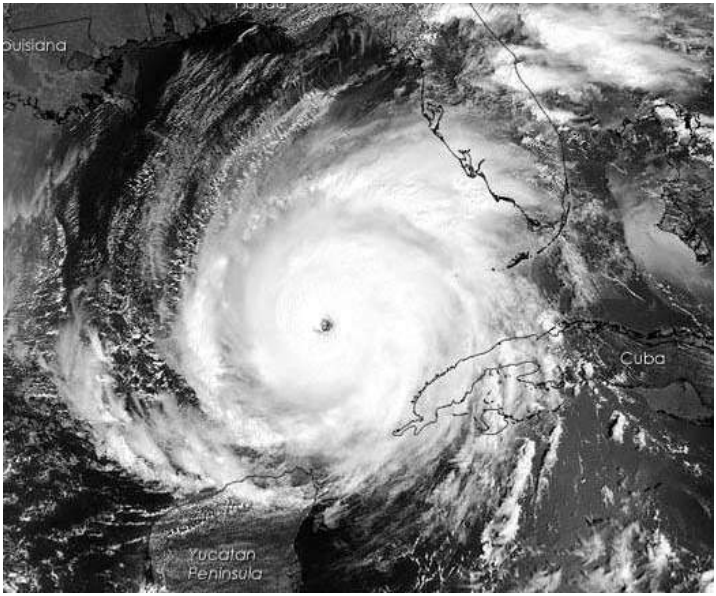


Рис. 5.160. Пожежі поблизу Волгограда у Росії.

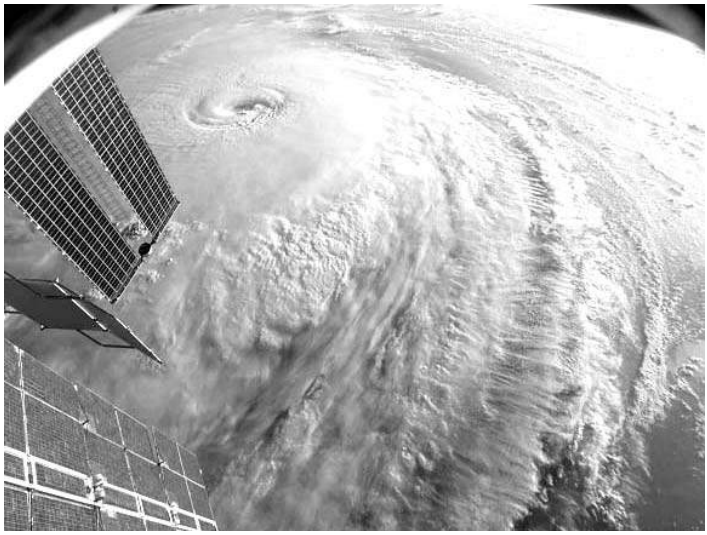
виглядають світлішими на літніх знімках і темнішими на зимових. Характер фототону визначають "піонерні" види рослин: спочатку трав'яні рослини, потім чагарники і далі деревні види – також спочатку "піонерні" світлолюбні (береза, осика, верба), а вже пізніше можливе відновлення корінного деревостану.

Згарища в степах і саванах мають подібні дешифрувальні ознаки, однак з часом втрачаються швидше.

Можливість отримання знімків практично в будь-який час і для будь-якої території, тобто можливість постійного моніторингу, дає змогу стежити за швидкими процесами, наприклад, за швидким сніготаненням, пересуванням дощових фронтів, паводками на ріках, виверженням вулканів, цунамі, тайфунами (рис. 5.161), прогрівом морських і прибережних вод та ін. Космічне знімання дає найнадійніші та найуніверсальніші першоджерела інформації. Вони дозволяють не тільки аналізувати сучасний




*а*



*б*

Рис. 5.161. Тайфун у Мексиканській затоці:
*а* – вигляд на космознімку в плані, *б* – вигляд з МКС у перспективі.

розвиток явища, а й порівнювати з подібними процесами, які відбувалися раніше і прогнозувати розвиток сучасних.

В цьому відношенні найперспективнішим є шлях створення ГІС – географічних інформаційних систем – комплексних чи спеціалізованих. Роль географічних підходів тут стає провідною, бо на перше місце виходять географічні карти: сучасного стану природних ресурсів, динаміки природних ресурсів, ретроспективні і карти перспектив розвитку природних ресурсів. Подальшим етапом можуть стати карти рекомендацій з управління природними ресурсами, щодо запобігання розвитку негативних явищ.

Отже, методи дистанційних досліджень земної поверхні можуть бути застосовані для вирішення найрізноманітніших природоохоронних проблем, розв'язання геоекологічних завдань, а в перспективі – для створення глобального універсального моніторингу розвитку природних тенденцій та їхнього регулювання.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. *Азбукина Е.Н.* Дешифрирование аэрофотоснимков для геоморфологических исследований. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1969.– 64 с.
2. *Аковецкий В.И.* Дешифрирование снимков. – М.: Недра, 1983. – 374 с.
3. *Анцев В.Г., Геодаков А.И., Журба Ю.И. и др.* Краткий справочник фотолюбителя. –М.: Искусство, 1985. – 367 с.
4. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом "Алмаз-1" / А.В. Дикинис, А.Ю. Иванов и др.; под ред. Л.Н. Карлина. – М.: ГЕОС, 1999.
5. Аэрокосмические методы в социально-экономической географии. Под ред. Книжникова Ю.Ф. – Изд. Моск. ун-та, 1983. – 203 с.
6. *Байрак Г.Р.* Аналіз рельєфу і природокористування рівнин заходу України за аерокосмічними даними. – Львів: Видавн. Центр ЛНУ, 2007. – 296 с.
7. *Баррет Э., Куртис Л.* Введение в космическое землеведение. Дистанционные методы исследования Земли. – М.: Прогресс, 1979. – 368 с.
8. *Баттан Л. Дж.* Радиолокационная метеорология. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 166 с.
9. *Берлянт А.М.* Геоиконика. – М.: Астрея, 1996. – 223с.
10. *Богомолов Л.А.* Дешифрирование аэрофотоснимков. – М.: Недра, 1976. – 145 с.
11. *Богородский В.В., Козлов А.И.* Микроволновая радиометрия земных покровов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 272 с.
12. *Большаков А.А.* Космические методы в океанологии. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
13. *Бурштинська Х.В.* Аерофотографія. Підручник. – Львів: ЛАГТ, 1999. – 356 с.
14. *Брюханов А.В., Господинов Г.В., Книжников Ю.Ф.* Аэрокосмические методы в географических исследованиях.– М.: Изд-во Москов. ун-та, 1982. – 231 с.
15. *Верещака Т.В. Подобедов Н.С.* Полевая картография. – М.: Недра, 1986. – 351 с.
16. Визуальные методы дешифрирования. – М.: Недра, 1990. – 310 с.
17. *Викторов А.С.* Рисунок ландшафта. – М.: Мысль, 1986. – 178 с.
18. *Виноградов Б.В.* Космические методы изучения природной среды. – М.: Мысль, 1976. – 286 с.
19. *Виноградов Б.В.* Преобразованная земля. Аэрокосмические исследования. – М.: Мысль, 1981. – 282 с.

20. *Виноградов Б.В., Кондратьев К.А.* Космические методы землеведения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 190 с.
21. *Выгодская Н.Н., Горшкова И.И.* Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 246 с.
22. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Изд. А и В, 2003. – 296 с.
23. *Герман М.А.* Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 351 с.
24. *Герман М.А.* Спутниковая метеорология. Основы космических методов исследования в метеорологии. Учебн. пособие. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 367 с.
25. *Гильберг Л.А.* От самолета к орбитальному комплексу. – М.: Просвещение, 1992.
26. ГИС с дистанционным потоком информации: Сб. науч. ст. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1990. – 123 с.
27. *Гонин Г.Б.* Космическая фотосъемка для изучения природных ресурсов. – Л.: Недра, 1980. – 329 с.
28. *Григорьев А.А.* Антропогенные воздействия на природную среду по наблюдениям из космоса. – Л.: Наука, 1985. – 239 с.
29. *Григорьев А.А., Липатов В.Б.* Дымовые загрязнения атмосферы по наблюдениям из космоса. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 36 с.
30. *Гурлев Д.С.* Справочник по фотографии. Светотехника и материалы. – К.: Техника, 1986. – 368 с.
31. *Данюлис Е.П., Жирин В.М., Сухих В.И.* Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1989. – 220 с.
32. Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков. Методика и результаты. – М.: Наука, 1982. – 82 листа с ил.
33. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанологии и гидрологии. М., 1984.
34. Дистанционное зондирование: количественный подход / Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.Я., Филлипс Т.Л. и др. – М.: Недра, 1983. – 415 с.
35. Дистационное зондирование Земли: Обзор. информации. – СПб., 2000. – Вып. 1. – 81 с.
36. Дистанционные исследования природных ресурсов. Сб. науч. ст. – М.: Московский филиал географического общества СРСР, 1981. – 81 с.
37. *Дмитриев И.Е., Мурахтанов Е.С., Сухих В.И.* Лесная авиация и аэрофотосъемка: Учебнык для вузов. – М: Агропромиздат, 1989. – 365 с.
38. *Дорожинський О.Л., Тукай Р.* Фотограмметрія: Підручник. – Львів: Видавництво Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2008. – 332 с.

39. *Ерлов Н.Г.* Оптическая океанография. – М.: Мир, 1970. – 244 с.
40. *Живичин А.Н., Соколов В.С.* Дешифрирование фотографических изображений. – М.: Недра, 1985. – 253 с.
41. *Загульська О.Б.* Завдання та методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу "Ландшафтна інтерпретація аерокосмічної інформації" – Львів: ЛНУ, 1999. – 43 с.
42. *Заитов И.Р.* Аэрофотометоды в географических исследованиях. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1974. – 206 с.
43. *Захарко Е.Я., Муха Б.П.* Інформаційна структура та дешифрувальні ознаки аерокосмічних зображень – аналіз з точки зору розпізнавання образів. Журн. Вісник геодезії і картографії. 1997.
44. *Ильинский Н.Д., Обиралов А.И., Фостиков А.А.* Фотограмметрия и дешифрирование снимков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
45. Исследование природной среды космическими средствами. География. Методы космической фотосъемки. Сб. статтей. Т. 4. – М., 1975. – 243 с..
46. *Кац Я.Г., Рябухин Д.М., Трофимов Д.М.* Космические методы в геологии. – М.: Изд. Моск. ун-та, 1976. – 248 с.
47. *Кац Я.Г., Тевелев А.В., Полетаев А.И.* Основы космической геологии: Учеб. пособие. – М.: Недра, 1988. – 235 с.
48. *Киенко Ю.П.* Основы космического природоведения: Учебник для вузов. – М.: Картгеоцентр–Госгеоиздат, 1999. – 285 с.
49. *Киреев Д.М.* Методы изучения лесов по аэроснимкам. – Новосибирск: Наука, 1977. – 282 с.
50. *Кислов В.В.* Фотограмметрия. – М.: Недра, 1979. – 215 с.
51. *Книжников Ю.Ф.* Аэрокосмическое зондирование. Методология, принципы, проблемы. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1997. – 129 с.
52. *Книжников Ю.Ф.* Основы аэрокосмических методов географических иследований. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1980. – 137 с.
53. *Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И.* Аэрокосмические исследования динамики географических явлений.– М.: Изд-во Москов. ун-та, 1991.– 205 с.
54. *Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.* Аэрокосмические методы географических исследований: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр "Академія", 2004. – 336 с.
55. *Кондратьев К.Я. и др.* Метеорологическое зондирование подстилающей поверхности из космоса. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 247 с.
56. *Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П.* Аэрокосмические методы исследования растительности. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 231 с.

57. *Кондратьев К.Я., Федченко П.П.* Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 216 с.
58. Космические исследования для градостроительства. – Л.: Стройиздат, 1981. – 175 с.
59. Космические исследования на Украине: Респ. межвед. сб. – 1984. – Вып. 18. – 103 с.
60. Космические методы геоэкологии. – М., 1998.
61. Космическая съемка и тематическое картографирование. Географические результаты многозональных космических экспериментов. Под ред. Салищева К.А., Книжникова Ю.Ф. – Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 272 с.
62. *Костыков Ю.В., Крыжановский В.Д.* Основы телевидения. – М.: Военное изд-во Мин. обороны СРСР, 1965. – 440 с.
63. *Кравцова В.И.* Генерализация аэрокосмического изображения: континуальные и дискретные снимки. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. – 256 с.
64. *Кравцова В.И.* Космическое картографирование. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1977. – 168 с.
65. *Кравцова В.И.* Материалы космических съемок и их использование в географических исследованиях. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1980. – 98 с.
66. *Красовский Г.Я., Петросов В.А.* Введение в методы космического мониторинга окружающей среды: Учеб. пособие. – Харьков: Гос. аэрокосмический ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 1999. – 206 с.
67. *Красовський Г.Я., Петросов В.А.* Інформаційні технології космічного моніторингу водних екосистем і прогнозу водоспоживання міст. – К.: Наукова думка, 2003. – 223 с.
68. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 350 с.
69. *Лаврова Н.П., Стеценко А.Ф.* Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование. – М.: Недра, 1981. – 296 с.
70. *Ландсберг Г.С.* Элементарный учебник физики. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Наука, 1986. – 656 с.
71. *Легейда В.В.* Photoshop CS2. Настоящий самоучитель. – К.: ВЕК+, СПб.: Корона, К.:НТИ, 2006. – 528 с.
72. *Лютый А. А., Малахова Н. Н.* Аэрокосмическая информация в изучении и картографировании социально-экономических территориальных систем. – М.: ИГ АН СССР, 1987. – 108 с.
73. *Мазур П.* Україна – космічна держава // Молодь України. №12. 14–18 лютого 2008 р. – С. 22–23.
74. *Макаров В.И. Рябухин А.Г.* Космические методы в геологии. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1988. – 145 с.

75. *Малкевич М.С.* Оптические исследования атмосферы со спутников. – М.: Наука, 1973. – 303 с.
76. *Мациевский С.В., Ишанов С.А., Клевцур С.В.* Информатика: Учебное пособие. – Калининград: КГУ, 2003. – 140 с.
77. *Мелуа А.И.* Космические природоохранные исследования. – Л.: Наука, 1988. – 175 с.
78. Методы дешифрирования природных объектов по их многозональным изображениям // Тр. ГосНИЦИПР. – 1976. – Вып. 2. – 178 с.
79. *Миронов Д.Ф.* Основы Photoshop CS2.Учебный курс. – СПб.: Питер, 2006. – 384 с.
80. *Михайлов А.Е., Рамм И.С.* Аэрометоды при геологических исследованиях.- М.: Недра, 1975. – 197 с.
81. *Михайлова Н.А., Орлов Д.С.* Оптические свойства почв и почвенных компонентов. – М.: Наука, 1986. – 118 с.
82. *Мишев Д.* Дистанционное исследование Земли из космоса. Пер. с болг. – М.: Мир, 1985. – 230 с.
83. *Муха Б.П., Загульская О.Б.* Изучение ландшафтно-геофизических характеристик в западном регионе УССР применительно к задачам дешифрирования дистанционных данных. // Отчет по НИР. Инв.02.87.0029582. Номер госрегистрации 01.87.0019799. – М.: ВНТИ ЦЕНТР, 1987. – 166 с.
84. *Некос А.Н., Щукін Г.Г., Некос В.Ю.* Дистанційні методи досліджень в екології. Навч. посібник. – Харків: ХНУ ім. В.І. Каразіна, 2007. – 372 с.
85. *Некос В.Е. Бутенко В.И.* Теория и методология исследования геофизических полей геосистем . – К.: УМК ВО, 1988. – 94 с.
86. *Некос В.Е.* Методики радиогеографии. – Харьков: ХГУ, 1989. – 88 с.
87. *Орлов В.И.* Анализ динамики природных условий и ресурсов. – М.: Наука, 1975. – 275 с.
88. *Петрусевич М.Н.* Аэрометоды при геологических исследованиях. – М.: Недра, 1962. – 408 с.
89. *Попова В.Б.* Аэрометоды в геоморфологических исследованиях. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1968. – 94 с.
90. Применение аэрокосмических методов для изучения и контроля состояния земной поверхности: Сб. науч. ст. – М.: Изд-во Москов. ун-та, 1986. – 82 с.
91. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под. ред. С.В. Викторова и Л.М. Митника. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 200 с.
92. *Рачкулик В.И., Ситникова М.В.* Отражательные свойства и состояние растительного покрова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 287 с.
93. *Росс Ю.К.* Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. – Л. Гидрометеоиздат , 1975. – 342 с.

94. *Рябухин А.Г., Макаров В.И., Макарова Н.В.* Космические методы в геологии. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 146 с.
95. *Савиных В.П., Цветков В.Я.* Геоинформационный анализ дистанционного зондирования. – М.: Геодезиздат, 2001. – 224 с.
96. *Садов А.В.* Изучение экзогенных процессов аэроландшафтным методом. – М.: Недра, 1978. – 151 с.
97. *Сергійчук В.* Що дала Україна світові. – К., 2008. – 479 с.
98. *Сердюков В.М., Патыченко Г.А., Синельников Д.А.* Аэрокосмические методы географических исследований. – К.: Вища школа, 1987. – 223 с.
99. *Сладкопевцев С.А.* Изучение и картографирование рельефа с использованием аэрокосмической информации. – М.: Недра, 1982. – 216 с.
100. Словник з дистанційного зондування Землі. – К.: СМП "Аверс", 2004.
101. *Смирнов Л.Е.* Аэрокосмические методы географических исследований. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1975. – 303 с.
102. "Союз-22" исследует Землю / Под ред. Р.З. Сагдеева, Stiller H. – М.: Наука, 1980. – 231 с.
103. Тематическое картографирование по материалам космических съемок: Сб. науч. ст. – М.: ЦНИИГАиК, 1978. – Вып. 2. – 106 с.
104. *Тищенко А.П., Викторов С.В.* Природа Земли из космоса. Изучение природных ресурсов Земли с помощью данных, передаваемых со спутников по радиоканалам. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 151 с.
105. Україна з космосу. Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів / За ред. В.І. Лялька, О.Д. Федоровського – К.: НАН України, 1999. – 34 с.
106. Український космос. Космічна енциклопедія / Упорядники Чередниченко В., Грабовський С., Абліцов В., Гаркуша В., Малковіц І. – К.: АБАБАГАЛАМАГА, 2009. – 45 с.
107. Українська програма спостереження Землі із Космосу: Зб. статей. – К.: ТОВ "СЕЕМ", 2005. – 93 с.
108. *Федоров Б.Ф.* Аппаратура космического фотографирования. – М.: Недра, 1985. – 216 с.
109. *Харин Н.Г.* Дистанционные методы изучения растительности. – М.: Наука, 1975. – 132 с.
110. *Чередниченко В.* Генерал Засядько: родовід козацький, ім'я світове. // Україна Молода від 17 червня 1999 року. – С. 12.
111. *Шанда Э.* Физические основы дистанционного зондирования. – Москва: Недра, 1990. – 208 с.
112. *Шульц С.С.* Земля из космоса. – Л.: Недра, 1984. – 108 с.

*113. Шутко А.М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. – М.: Недра, 1986. – 190 с.
114. Яворский Б.М., Селезнев О.А. Справочное руководство пр физике. Издание четвертое, исправленное. – М.: Наука, 1989. – 576 с.
*115. Янутш Д.А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков. – М.: Недра, 1991. – 240 с.

116. ArcGIS 9. Начало работы. – М.: DATA+, 2004. – 272 с.
*117. Ciołkosz A., Miszalski J., OlędzkiJ-R.* Interpretacja zdjęć lotniczych. – Warszawa, Wydawnictwo naukowe PWN, 1999. – 460 s.
*118. Endlicher W., GroЯmann H.* Fernerkundung und Raumanalzse. – Herbert Rfrlsruhe,Wichman Verlag, 1986. – 222 s.
119. ERDAS Field Quide. Przewodnik geoinformatyczny. – Warszawa: Geosystems Polska, 1998. – 592 s.
120. Furniss T., Shayler D. Praxis Manned Spaceflight Log 1961-2006. – Chichester, UK, 2077. – 856 s.
121. Manual of Remote Sensing, Amer. Soc. Photogramm., 1983. – 244 p.
*122. Olendski Jan R.* Regiony Fotomorficzne Polski. – Warszawa, 2001. – 245 s.
123. Teledetekcja srodowiska. Fotointerpretacja w geografii. – Warszawa: Polskie Towarzystwo Geograficzne, 1998–2007.

124. http://gis-lab.info – сайт з питань ГІС та ДЗЗ
125. http://nsmc.cma.gov.cn – Національний центр дистанційного зондування Китаю (NSMC)
126. http://radarsat.space.gc.ca – Канадське космічне агентство (CSA)
127. http://space.com.ua – Аерокосмічний портал України
128. http://sputnik.infospace.ru – Інститут космічних досліджень РАН і НПО “Планета”
129. http://ru.wikipedia.org – Вільна енциклопедія
130. www.asrtolab.ru – статті про Всесвіт, Галактики, планети, космічні апарати та ін.
131. www.casre.kiev.ua – Центр космічних досліджень землі ІГН НАН України
132. www.ccsds.org – Канадський центр дистанційного зондування (CCRS)
133. www.digitalglobe.com – Компанія DigitalGlobe
134. www.dlr.de/DLR-Homepage – Німецький центр аерокосмічних досліджень (DLR)
135. www.dniprokosmos.dp.ua – Державне підприємство “Дніпрокосмос”
136. www.earth.google.com – віртуальне представлення Землі на космознімках

137. www.ecomm.kiev.ua – Компанія ECOMM
138. www.envisat.esa.int – Проект Envisat
139. www.erdas.com – Компанія ERDAS
140. www.esa.int – Європейське космічне агентство (ESA)
141. www.esri.com – Компанія ESRI
142. www.eurimage.com – Компанія Eurimage
143. www.imagenet.com – Архів зображень ImageNet (Ізраїль)
144. www.isro.org – Індійська організація з космічних досліджень (ISRO)
145. www.jaxa.jp – Японське агентство аерокосмічних досліджень (JAXA)
146. www.geosystems.com.pl – Компанія ГІС та обробки даних ДЗЗ Польщі
147. www.mcc.rsa.ru – Центр управління космічними польотами Росії (ЦУП-М)
148. www.nasa.gov – Національне аерокосмічне управління США (NASA)
149. www.nasda.go.jp – Центр управління Національного агентства з розвитку аерокосмічної галузі (NASDA, Японія)
150. www.nkau.gov.ua – Національне космічне агентство України
151. www.pryroda.gov.ua – ДНВЦ "Природа"
152. www.space.com.ua – Аерокосмічний портал України
153. www.spaceflightnow – Європейські новини з космонавтики
154. www.spaceimaging.com – Компанія Space Imaging
155. www.spot.com – Компанія SPOT
156. www.spotimage.fr – Компанія SPOT Image
157. www.ulrmc.org.ua – Український центр менеджменту землі та ресурсів
158. www.unaec.dp.ua – Національний центр аерокосмічної освіти молоді України
159. www.usgs.gov – Геологічна служба США (USGS)
160. www.yuzhnoye.dp.ua – Державне конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля

# АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

GPS-приймачі 62, 137, 254
Аберація зображень 230
Авіаційні носії 131
Аерофотоапарат 223
Аерофотоапарат
цифровий 198, 250
Акомодація 297
Альбедо поверхні 89
Альтиметр 615
Амплітуда коливання 76
Апертура 259
Апогей орбіти 13, 169

Базис фотографування 327
Бінокулярне (стереоскопічне)
бачення 300

Векторизація даних
(оцифрування даних) 376
Вимірювання висот об’єктів 325
Вимірювання довжин ліній 320
Вимірювання крутизни
схилів 329
Вимірювання площ 321
Випромінювальна здатність
тіл 76
Випромінювання Землі 109
Випромінювання
інфрачервоне 83
Випромінювання радіо 84
Випромінювання сонячне 72, 87, 96
Випромінювання штучне 114
Відзеркалення 122
Відикон 236
Вікна прозорості атмосфери 92

Геокодування знімків
(див. прив’язка знімків) 368
ГІС-аналіз 378
Гістограма 358

Денситометрична шкала 308
Дешифрування 269
Дешифрування візуальне 277
Дешифрування загальне 276
Дешифрування індикаційне 293
Дешифрування
інструментальне 278
Дешифрування камеральне 279
Дешифрування польове 278
Дешифрування регіональне 277
Дешифрування тематичне
(галузеве) 277
Джерела випромінювання ЕМХ 71
Дисектор 235
Дисперсія 83
Дифракція 83

Електромагнітний спектр 78
ЕМХ 73
ЕМХ довжина 75
ЕМХ інтенсивність 76
ЕМХ оптичні 80
ЕМХ період коливання 75
ЕМХ поширення 76
ЕМХ частота коливання 75

Знімання багатозональне 197
Знімання інтегральне 195
Знімання інтерферометричне 212
Знімання інфрачервоне
(теплове) 207
Знімання лазерне 204, 213
Знімання планове, перспективне
і панорамне 220
Знімання площинне
і маршрутне 218
Знімання радіолокаційне 209, 210
Знімання радіотеплове 208
Знімання сканерне 201
Знімання спектрозональне 196
Знімання телевізійне 200
Знімання фотографічне 188
Зоровий аналізатор 183
Зсув добовий 176
Зсув міжобертовий 176

Індикатори 293
Індикатриса відбиття 100
Інтерпретація 269
Інтерпретоскоп 345
Інтерференція 74, 82

Камера МКФ-6 233
Камера телевізійна (електронна) 235
Камера цифрова 248
КА Буран 34
КА Прогрес 25
КА Спейс шатл 28, 159
Класифікація зображень 371
Комбінація каналів 367
Контраст яскравості 98
Контрастування 312
Корекція зображення 304, 357
Корекція зображень кольорова 360
Корекція зображень тонова 357
Космічна швидкість 172
Космічні носії 133

Локатори бічного огляду 255, 260
Лупа 340

Малюнок зображення 291
Масштаб перспективних знімків 317
Масштаб планових знімків 315
Мікрофотометр 344
Мікрохвильовий діапазон 85
МКС 39, 162
Монокулярне бачення 300

Об'єктиви АФА 225, 228
Оверлейновий аналіз 378
Ознаки дешифрування комплексні 286
Ознаки дешифрування непрямі 292
Ознаки дешифрування прямі 279
Оптична неоднорідність об'єкта 97
Орбіти "сутінкові" 178
Орбіти геліосинхронні 176
Орбіти геостаціонарні 174
Орбіти екваторіальні 174
Орбіти кругові та еліптичні 171
Орбіти низькі, середні і високі 178
Орбіти полярні 174
Орбіти прямі і зворотні 178
Орбіти субполярні (нахилені) 177
Орбіти ШСЗ 134
Освітленість поверхні 81, 89, 97
ОС Мир 37, 160
ОС Салют 24,155
ОС Скайлеб 26,158
ОС МКС (див. МКС) 39, 162

Перетворення виду 305
Перетворення геометричне 306
Перетворення електронні 313
Перетворення фотометричні 311
Перетворення фотохімічні 308
Перигей орбіти 13, 169
Період обертання ШСЗ 172
Піксель 348
ПК Аполлон 21
ПК Восток 17, 151
ПК Восход 20, 153
ПК Джеміні 20
ПК Меркурій 18, 152
ПК Союз 21, 154
Палітра кольорів RGB 348
Палітра кольорів CMYK 349
Плівки фотографічні 192
Поглинання сонячних променів 123
Поздовжній паралакс 327
Помилки вимірювань 322
Прив'язка знімків 368
Приймачі зарядового зв'язку 263
Програми векторні ГІС 376
Програми графічні редактори 357
Програми растрові ГІС 364
Проектор багатозональний синтезуючий 336
Проектор мультиспектральний 336

Проектор настільний 342
Проектор універсальний топографічний 335
Прозорість атмосфери 124

Радіація 89
Радіовисотометр 259
Радіолокатори (див. локатори бічного огляду) 255, 260
Радіометри 265
Растр 348
РАШ 72
Рефракція атмосфери 122
Роздільна здатність фотооб’єктива 230
Роздільна здатність знімків 318, 355
Роздільна здатність монітора 354
Роздільна здатність очей 298
Роздільна здатність сканера 352
Розсіювання сонячних променів 123

Світлові промені 80
Синтезування 312
Сканери 201, 240, 253
Скаттерометри 259, 621
Спектральна відбивна здатність об’єктів 102, 104
Стереоефект 300, 342
Стереометр 344
Стереопроектор Романовського 335
Стереоскоп 341
Структура зображення 286

Текстура зображення 288
Траєкторія польоту 168
Трикутна нерегулярна мережа (TIN) 377

Фільтрація зображень 313
Фокусна віддаль 82, 228
Фотоефект 83
Фотозбільшувачі 331
Фотометри 344
Фототрансформатори 332

Час існування ШСЗ 173
Чутливість очей контрастна 298
Чутливість очей спектральна 299

Шатл (див. КА Спейс шатл) 28, 159
Швидкість звільнення ШСЗ 172
ШСЗ ВолдВ’юв (WorldView) 150
ШСЗ Енвісат (Envisat) 147
ШСЗ Ерос (Eros) 148
ШСЗ ЕССА (ESSA) 139
ШСЗ Іконос (Ikonos) 148
ШСЗ ІРС (IRS) 148
ШСЗ Квік Бьорд (QuickBird) 149
ШСЗ Лендсат (Landsat) 143
ШСЗ Метеор 141
ШСЗ Метеор-Природа 144
ШСЗ Метеосат (Meteosat) 141
ШСЗ Німбус 139
ШСЗ НОАА (NOAA) 139
ШСЗ ОрбВ’юв (OrbView) 150
ШСЗ Океан 44, 46
ШСЗ Ресурс 145
ШСЗ Січ 44, 47
ШСЗ СПОТ (SPOT) 146
ШСЗ Тайрос (TIROS) 138
ШСЗ Терра (Terra) 148

Яскравість інтегральна 97
Яскравість поверхні =альбедо 89
Яскравість спектральна 102, 104

# ЗМІСТ

**Передмова** ..... 3

**1. Історія аерофото- і космічних досліджень** ..... 7

1.1. Становлення і розвиток аероспостережень ..... 7
1.2. Від перших космічних супутників до пілотованих кораблів..... 12
1.3. Від космічних кораблів до орбітальних станцій ..... 16
1.4.Історія космічних станцій багаторазового використання .. 24
1.5. Історія створення космічних засобів спостереження Землі в Україні..... 43
1.6. Українські імена в історії космонавтики ..... 51

**2. Фізичні основи та природні умови дистанційних досліджень землі** ..... 71

2.1. Природа електромагнітного випромінювання ..... 73
2.2. Взаємодія сонячного випромінювання із Землею ..... 87
2.2.1. Сонячне випромінювання і його проходження через атмосферу ..... 87
2.2.2. Сонячне випромінювання і його відбиття наземними об'єктами ..... 96
2.2.3. Власне випромінювання Землі ..... 109
2.2.4. Штучне (радіо) випромінювання..... 114
2.2.5. Вплив атмосфери на висхідне випромінювання..... 120

**3. Технічне забезпечення дистанційного знімання**..... 131

3.1. Носії апаратури аерофото- і космічного знімання ..... 131
3.1.1 Авіаційні носії..... 131
3.1.2. Космічні носії..... 133
3.1.2.1 Штучні супутники Землі (ШСЗ)..... 136
3.1.2.2 Пілотовані кораблі..... 150
3.1.2.3 Орбітальні станції ..... 154
3.2. Орбіти космічних носіїв апаратури ..... 167
3.2.1. Загальні поняття про орбіти ..... 167
3.2.2. Параметри орбіт ШСЗ..... 170
3.2.3. Типи орбіт ШСЗ ..... 174
3.3. Види дистанційного знімання ..... 179
3.3.1. Види знімань за використанням діапазонів електромагнітних хвиль..... 181
3.3.2. Класифікація за технічними засобами знімань ..... 214

3.3.3. Види знімань за масштабами ..... 216
3.3.4. Інші види знімань ..... 218
3.4. Апаратура дистанційного знімання ..... 222
3.4.1. Кадрові фотографічні камери ..... 223
3.4.2. Телевізійні (електронні) камери ..... 235
3.4.3. Сканерні апарати (сканери) ..... 240
3.4.4. Локатори бічного огляду ..... 255
3.4.5. Приймачі зарядового зв'язку ..... 263
3.4.6. Радіометри ..... 265

**4. Основи дешифрування та інтерпретації знімків** ..... 269

4.1. Суть аерокосмічної інтерпретації знімків ..... 269
4.2. Ознаки дешифрування об'єктів ..... 279
4.3. Фізіологічні, психологічні і професійні якості дешифрувальника ..... 294
4.4. Перетворення дистанційних матеріалів ..... 304
4.5. Види вимірювань на знімках ..... 314
4.5.1. Визначення масштабів знімків ..... 314
4.5.2. Вимірювання довжин ліній ..... 320
4.5.3. Визначення площ об'єктів на знімках ..... 321
4.5.4. Вимірювання висот об'єктів ..... 325
4.5.5. Визначення крутизни схилів на аерофотознімках ..... 329
4.6. Прилади для роботи зі знімками ..... 331
4.6.1. Прилади для перетворення знімків ..... 331
4.6.2. Прилади для інтерпретації знімків ..... 340
4.7. Основні програми з інтерпретації дистанційної інформації ..... 347
4.7.1. Введення та подання зображень на екрані монітора ..... 348
4.7.2. Опрацювання космічних та аерознімків у програмах–редакторах растрової графіки ..... 357
4.7.3. Опрацювання аеро- і космічних знімків у ГІС-растрових редакторах ..... 364
4.7.4. Особливості роботи з дистанційними даними у векторних ГІС ..... 376

**5. Географічна інтерпретація аерокосмічної інформації** ..... 391

5.1. Інтерпретація метеорологічних характеристик ..... 391
5.1.1. З історії космічних метеорологічних досліджень ..... 393
5.1.2. Метеорологічні супутники ..... 394
5.1.3. Знімальна апаратура метеорологічних супутників ..... 398
5.1.4. Метеорологічне дешифрування ..... 400

5.2. Інтерпретація геологічних структур ..... 415
5.2.1. Історія становлення аерокосмічних методів у геології ..... 415
5.2.2. Види дистанційних знімань для вивчення геологічних структур ..... 420
5.2.3. Методика геологічного дешифрування дистанційних зображень ..... 431
5.2.4. Інтерпретація видів геологічних утворень ..... 440
5.3. Інтерпретація типів рельєфу і морфодинамічних процесів ..... 468
5.3.1. Дешифрування морфологічних і морфометричних характеристик рельєфу ..... 470
5.3.2. Інтерпретація генетичних типів рельєфу ..... 475
5.3.3. Інтерпретація морфодинамічних процесів ..... 504
5.4. Інтерпретація об'єктів гідрографії ..... 509
5.4.1. Дешифрування рік ..... 509
5.4.2. Дешифрування озер ..... 518
5.4.3. Дешифрування морських узбереж ..... 528
5.5. Інтерпретація рослинного покриву ..... 532
5.5.1. Спектральний образ рослинності на космознімках ..... 533
5.5.2. Особливості відображення рослин на аерофотознімках ..... 549
5.6. Інтерпретація зображень ґрунтів ..... 556
5.6.1. Взаємодія ЕМХ з ґрунтами ..... 557
5.6.2. Особливості дешифрування ґрунтів на знімках ..... 569
5.7. Особливості зображення ландшафтних комплексів ..... 573
5.7.1. Використання еталонних зображень при дистанційному ландшафтному дешифруванні ..... 575
5.7.2. Характеристика еталонних космічних дрібномасштабних зображень основних типів природних геосистем ..... 580
5.8. Аерокосмічні дослідження в океанології ..... 596
5.9. Дистанційні дослідження сніжно-льодових явищ ..... 624
5.10. Дешифрування соціально-економічних об'єктів ..... 643
5.10.1. Методи та ознаки дешифрування ..... 644
5.10.2. Дешифрування видів соціально-економічних систем ..... 647
5.11. Еколого-географічні аерокосмічні дослідження ..... 683

**Список використаних джерел** ..... 698

Навчальне видання

**БАЙРАК Галина Ростиславівна,**
**МУХА Богдан Павлович**

# ДИСТАНЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕМЛІ

Навчальний посібник

*Рекомендовано*
*Міністерством освіти і науки україни*

Редактор *Кузик О.С.*
Технічний редактор *Сеник С.З.*
Коректор *Бурка Ю.А., Василяйко І.Ю.*
Комп'ютерне верстання *Буряк Н.В.*
Обкладинка *Роган В.О.*

Формат 60х90/16. Умовн. друк. арк. 44,5. Тираж 300 пр. Зам.

Видавничий центр
Львівського національного університету імені Івана Франка
79000, Львів, вул. Дорошенка, 41

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції.
Серія ДК № 3059 від 13.12.2007.