В. І. Зацерковний, В. В. Ворох

Дистанційне зондування Землі

ННІ "ІНСТИТУТ ГЕОЛОГІЇ"
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

В. І. Зацерковний, В. В. Ворох

ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Київ 2025

УДК 681.518.3:528
З-38

Рекомендовано до друку вченою радою
ННІ "Інститут геології" Київського національного університету
ім. Тараса Шевченка
(протокол № 2 від 29.08.2025 р.)

Рецензенти:

Станкевич С. А. – завідувач відділу геопросторового моделювання в аерокосмічних дослідженнях Державної установи "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", д.т.н., професор, лауреат Державної премії;

Четверіков Б. В. – професор кафедри фотограмметрії та геоінформатики НУ "Львівська політехніка", доктор технічних наук, доцент

Зацерковний В. І., Ворох В. В.

З-38 Дистанційне зондування Землі: навч. посіб. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2025. – 536 с.
ISBN 978-617-527-335-7

У навчальному посібнику викладено фізичні основи, методи і технічні засоби дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які сьогодні стали одним з найефективніших способів вивчення земної поверхні. Галузі та сфери застосування цих методів різноманітні і з кожним роком кількість їх невпинно зростає. Застосовуючи методи ДЗЗ дослідження, можна оцінити природні умови й особливості території, дослідити динаміку різних процесів, площ, зайнятих ріллею, лісами, водоймами, населеними пунктами, виконати геологічну оцінку і здійснювати моніторинг екологічного стану місцевості тощо. Важливою властивістю матеріалів ДЗЗ є комплексне відбиття одночасно всіх компонентів географічної оболонки, тому знімки є добрим підґрунтям комплексних геологічних і географічних досліджень.

Матеріали ДЗЗ є необхідними в повсякденній праці геологів, географів, фахівців з землеустрою та кадастру земель тощо.

Посібник може бути корисним для науковців, керівників державних установ, викладачів вищої школи, аспірантів і студентів та фахівців, що займаються дистанційними методами вивчення Землі та обробкою цифрових зображень.

УДК 681.518.3:528

ISBN 978-617-527-335-7 © В. І. Зацерковний, В. В. Ворох, 2025

ЗМІСТ

Вступ 10
І. Загальні відомості про дистанційні зондування Землі 18
1.1. Загальні відомості про дистанційні дослідження 18
1.1.1. Дистанційні спостереження за допомогою органів чуття 20
1.1.2. Дистанційні спостереження за допомогою технічних пристроїв 22
1.1.3. Методи дистанційних спостережень 25
1.2. Необхідність застосування дистанційних методів зондування 26
1.3. Сутність дистанційного зондування 28
1.4. Особливості супутникових знімків 30
1.5. Платформи систем дистанційного зондування 33
1.6. Складові компоненти системи ДЗЗ 34
1.7. Організація передачі даних з космосу на Землю 35
1.8. Тактико-технічні характеристики ефективності системи ДЗЗ 38

ІІ. Електромагнітне випромінювання в дистанційному зондуванні Землі 49
2.1. Джерела електромагнітного випромінювання 49
2.2. Характеристики електромагнітного випромінювання 52
2.3. Взаємодія електромагнітного випромінювання з речовиною 63
2.4. Діапазони електромагнітного випромінювання Сонця, що використовуються в ДЗЗ 64
2.5. Загальні відомості про випромінювання природних об’єктів 72
2.5.1. Закони Кірхгофа 72
2.5.2. Закон Стефана-Больцмана 75
2.5.3. Закон Віна 75
2.5.4. Формула Релея-Джинса 77
2.5.5. Закон Планка 78

ІІІ. Взаємодія електромагнітного випромінювання Сонця з атмосферою Землі 80
3.1.Загальні відомості про взаємодію електромагнітного випромінювання Сонця з атмосферою Землі 80
3.2. Атмосфера Землі і її складові 85
3.3. Поглинання електромагнітного випромінювання Сонця атмосферою Землі 89
3.4. Розсіювання електромагнітного випромінювання Сонця атмосферою Землі 95
3.4.1. Розсіювання за законом Релея (молекулярне розсіювання) 97
3.4.2. Розсіювання за законом Мі (аерозольне розсіювання) 100
3.4.3. Неселективне розсіювання 101
3.5. Вплив хмарності на дистанційне зондування 101

IV. Взаємодія електромагнітного випромінювання Сонця з підстильною поверхнею 105
4.1. Загальні відомості про взаємодію електромагнітного випромінювання з підстильною поверхнею 105
4.2. Альбедо 106
4.3. Типи взаємодії електромагнітного випромінювання Сонця з об'єктами на поверхні Землі 107
4.4. Типи відбиття електромагнітного випромінювання Сонця підстильною поверхнею 110
4.5. Оптичні відбивні характеристики об'єктів 114
4.5.1. Інтегральна яскравість 118
4.5.2. Коефіцієнт інтегральної (ахроматичної) яскравості 119
4.5.3. Контраст яскравості 119
4.5.4. Індикатриси відбиття 120
4.5.5. Коефіцієнт спектральної яскравості 121
4.6. Спектральна відбивна здатність природних об'єктів 125
4.6.1. Класифікація природних об'єктів за спектральною яскравістю 125
4.6.2. Спектральна відбивна здатність ґрунтів 126
4.6.3. Спектральна відбивна здатність рослинності 132
4.6.4. Спектральна відбивна здатність снігового покриву 136
4.6.5. Спектральна відбивна здатність водних поверхонь 138
4.7. Простір спектральних ознак 139

V. Власне випромінювання Землі 147
5.1. Характеристики власного випромінювання Землі 147
5.2. Рівняння теплового балансу (радіаційної рівноваги) 149
5.3. Інфрачервоне випромінювання Землі 152
5.4. Радіотеплове випромінювання Землі 155

VI. Методи та способи одержання інформації в системах ДЗЗ 158
6.1. Загальна характеристика методів ДЗЗ 158
6.1.1. Пасивні методи дистанційного зондування 159
6.1.2. Активні методи дистанційного зондування 160
6.2. Способи одержання інформації при дистанційному зондуванні 162
6.2.1. Візуальні і візуально-інструментальні спостереження 162
6.2.2. Фотографічні і телевізійні зйомки 163
6.2.3. Спектрометрична зйомка 166
6.2.4. Гіперспектральні зйомки 170
6.2.5. Сканерні зйомки 178
6.2.6. Інфрачервона та теплова зйомки 180
6.2.7. Радіотеплова зйомка 183
6.2.8. Радіолокаційна зйомка 183
6.2.9. Лазерна і лідарна зйомки 188

VII. Класифікація систем ДЗЗ..... 196
7.1. Загальні відомості про класифікацію систем ДЗЗ..... 196
7.2. Класифікація систем ДЗЗ..... 197
7.2.1. Класифікація систем ДЗЗ за типом носія 197
7.2.2. Класифікація систем ДЗЗ за побудовою зображення..... 197
7.2.3. Класифікація систем ДЗЗ за видом використовуваної знімальної апаратури 198
7.2.4. Класифікація систем ДЗЗ за використовуваними орбітами..... 200
7.2.5. Класифікація космічних систем ДЗЗ за масою 200
7.2.6. Класифікація космічних систем ДЗЗ за типом траєкторії..... 201
7.2.7. Класифікація систем ДЗЗ за використовуваними методами ... 201
7.2.8. Класифікація систем ДЗЗ за призначенням 203
7.2.9. Класифікація систем ДЗЗ за оглядовістю..... 203
7.2.10. Класифікація космічних систем ДЗЗ за просторовою розрізненністю..... 204
7.2.11. Класифікація космічних систем ДЗЗ за кількістю зон електромагнітного спектра..... 204
7.2.12. Класифікація космічних систем ДЗЗ за геометрію побудови знімка 205
7.2.13. Класифікація систем ДЗЗ за спектральним діапазоном роботи 205
7.2.14. Класифікація систем ДЗЗ за радіометричним розрізненням..... 206
7.2.15. Класифікація космічних систем ДЗЗ за часовими параметрами..... 207
7.2.16. Класифікація космічних систем ДЗЗ за способом доставки..... 207

VIII. Аерофотозйомка 213
8.1. Загальні відомості про аеро- та супутникову зйомку 213
8.2. Класифікація аерофотозйомки.....217
8.3. Складові етапи аерофотозйомки.....219
8.3.1. Планова аерофотозйомка.....226
8.3.2. Перспективна аерофотозйомка.....229
8.3.3. Стереотопографічна аерофотозйомка.....230
8.4. Аерофотозйомка з безпілотних літальних апаратів.....231
8.4.1. Обладнання для забезпечення аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів.....232
8.4.2. Технологія безпілотної зйомки.....233
8.4.3. Оброблення результатів фотографування.....234
8.4.4. Первинна обробка і контроль якості результатів зйомки 235
8.5. Вплив природних умов на якість аерозйомки.....237
8.6. Інформаційні властивості аерофотознімків.....239
8.6.1. Схема передачі інформації під час аерофотозйомки.....239
8.6.2. Оцінка можливостей дешифрування аерофотознімка 240

IX. Цифрові аерознімальні системи Землі 242
9.1. Загальні відомості про цифрові аерознімальні системи 242
9.2. Переваги цифрових аерознімальних камер перед аналоговими 243
9.3. Класифікація цифрових аерофотоапаратів.....248
9.4. Особливості формування кадру у цифрових АФА 250
9.5. Радіометричне і просторове розрізнення в цифрових АФА 254
9.6. Основні тактико-технічні характеристики цифрових АФА 254

X. Штучні супутники Землі, їх орбіти і характеристики 259
10.1. Класифікація супутників для ДЗЗ.....259
10.2. Характеристики орбіт космічних літальних апаратів.....265
10.2.1. Загальні відомості про умови польоту космічних апаратів ..265
10.2.2. Орбіти польоту космічних апаратів та їх характеристики....271
10.2.3. Висоти польоту космічних апаратів.....276
10.2.4. Період обертання космічних апаратів ДЗЗ.....278
10.2.5. Нахил орбіт космічних апаратів ДЗЗ.....278

XI. Супутникові знімки та їх характеристики.....281
11.1. Загальні визначення 281
11.2. Основні характеристик супутникових знімків 285
11.3. Класифікація супутникових знімків.....290
11.4. Порівняння характеристики аеро- та супутникових зйомок 293
11.5. Аналіз задач, що розв'язуються за допомогою
супутникових зйомок.....295
11.6. Методи отримання геоінформації зі знімків 298

XII. Аналіз структури супутникових даних 301
12.1. Форми збереження цифрових даних супутникової зйомки.....301
12.1.1. Растрова форма збереження цифрового зображення 301
12.1.2. Векторна форма збереження цифрового зображення 305
12.2. Методи стиснення цифрових даних супутникової зйомки.....306
12.2.1. Стиснення статичних зображень із втратами інформації.....308
12.2.2. Стиснення статичних зображень без втрат інформації 311
12.3. Формати запису матеріалів супутникової зйомки 315

XIII. Дешифрування супутникових знімків.....321
13.1. Загальні відомості про дешифрування МДЗ 321
13.2. Класифікація видів (методів) дешифрування 322
13.2.1. Візуальне дешифрування.....326
13.2.2. Автоматизоване й автоматичне дешифрування.....327
13.3. Інформаційні властивості МДЗ.....329
13.4. Вимоги до якості дешифрування.....331
13.5. Класифікація дешифрувальних ознак.....331
13.5.1. Прямі дешифрувальні ознаки 333
13.5.2. Непрямі дешифрувальні ознаки 339
13.6. Вплив природних умов зйомки на ефективність дешифрування ..343

XIV. Тематична обробка знімків.....344
14.1. Загальні відомості про тематичну обробку супутникових знімків.. 344
14.2. Принцип синтезу кольору.....345
14.3. Спектральні перетворення.....350
14.3.1. Індексні зображення 351
14.3.2. Перетворення Каута-Томаса.....355
14.3.3. Перетворення методом головних компонент.....356
14.3.4. Метод спектрального поділу 360

XV. Методи класифікації в тематичній обробці супутникових знімків.....362
15.1. Загальні відомості про класифікацію.....362
15.2. Класифікації в тематичній обробці МДЗ 364
15.3. Керована класифікація (класифікація з навчанням) 367
15.4. Некерована (непараметрична) класифікація.....378
15.4.1. Робастні алгоритми.....381
15.4.2. Рангова статистика 382
15.4.3. Двовибірний алгоритм Вілкінсона 383
15.5. Декореляція фону 384

XVI. Основні операції та рівні наземної обробки даних супутникової зйомки.....387
16.1. Загальні відомості про наземну обробку даних.....387
16.2. Основні операції наземної обробки даних супутникової зйомки...388
16.3. Рівні наземної обробки даних супутникової зйомки.....393
16.4. Попередня обробка даних ДЗЗ.....396
16.5. Первинна обробка (нормалізація) даних ДЗЗ 397
16.5.1. Геометричне корегування супутникових зображень.....398
16.5.2. Радіометричне калібрування (радіометрична корекція) знімків.....404

XVII. Коригування геометричних викривлень супутникових знімків.....411
17.1. Причини появи геометричних викривлень супутникових знімків .. 411
17.2. Методи корекції геометричних викривлень.....413
17.2.1. Класифікація методів корекції.....413
17.2.2. Вибір опорних точок для геометричних викривлень.....414
17.2.3. Перетворення координат 415
17.2.4. Ресемплінг 418
17.2.5. Ортотрансформування 421

XVIII. Покращення якості зображень 427
18.1. Загальні відомості про методи покращення зображень 427
18.2. Глобальне перетворення контрасту.....432
18.2.1. Лінійне перетворення контрасту (лінійне контрастування).....433

18.2.2. Нелінійне перетворення контрасту
(нелінійне контрастування) 435
18.3. Локальне перетворення контрасту 442
18.4. Контрастування кольорових зображень 443
18.4.1. Колірні моделі 443
18.4.2. Перетворення кольорів із системи RGB на систему IHS 445
18.4.3. Перетворення кольорів із системи IHS на систему RGB 446
18.4.4. Перетворення контрасту колірних знімків 447

XIX. Фільтрація зображень у просторовій зоні 449
19.1. Типи шумів 449
19.2. Просторові методи перетворень зображень ДЗЗ 452
19.3. Просторова фільтрація 455
19.4. Масочна фільтрація 459
19.5. Лінійна фільтрація 463
19.6. Особливості застосування і реалізації лінійних фільтрів 465
19.7. Нелінійна фільтрація 466
19.8. Фільтрація в зоні просторових частот 469
19.8.1. Фур'є-аналіз зображення 469
19.8.2. Фільтрація за допомогою перетворення Фур'є 470
19.8.3. Амплітудно-частотна характеристика фільтра 471
19.9. Статистична оцінка якості зображення 471

XX. Спектральні перетворення зображень 474
20.1. Простір ознак. Сутність спектральних перетворень 474
20.2. Вегетаційні індекси як приклад спектральних перетворень 475
20.3. Аналіз головних компонент 477
20.4. Перетворення "ковпак із пензлем" 480
20.5. Об'єднання знімків з різним просторовим розрізненням 482
20.5.1. Комплексування даних багатозональної зйомки.
Злиття зображень 482
20.5.2. Класифікація методів злиття зображень 483
20.5.3. Оцінка якості злиття зображень 489
20.5.4. Аналіз супутникових знімків 490
20.6. Фрактальний аналіз космічних зображень 492
20.6.1. Фрактальна розмірність зображення 492
20.6.2. Методи розрахунку фрактальної розмірності 494
20.6.3. Приклади фрактальної обробки супутникових знімків 497

XXI. Особливості мікрохвильової зйомки в ДЗЗ 501
21.1. Принципи радіолокації 501
21.2. Особливості радіолокаційної зйомки 503
21.3. Викривлення радіолокаційних зображень 506
21.4. Формування радіолокаційного зображення 508

21.5. Шуми радіолокаційного зображення 511
21.6. Сучасні методи застосування радіолокаційного зондування 513

XXII. Технологія радіолокаційної зйомки 515
22.1. Довжина і частота радіохвиль при радіолокаційній зйомці земної поверхні 515
22.2. Поляризація сигналу.....516
22.3. Геометрія радіолокаційної зйомки 517
22.4. Просторове розрізнення радіолокаційних зображень 518
22.5. Режими огляду космічних РСА 520
22.6. Режими роботи космічних РСА.....522
22.7. Властивості об’єктів, що впливають на характер радіолокаційного зображення 524

Список використаних джерел.....528

ВСТУП

Тільки тоді можна зрозуміти сутність речей,
коли знаєш їх походження і розвиток.
Геракліт

Однією з проблем сучасного суспільства є отримання об'єктивної, точної й актуальної інформації про навколишнє середовище. Найперспективнішим методом вирішення цієї проблеми є застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Це викликано передусім згортанням наземних і авіаційних засобів контролю навколишнього середовища, з одного боку, і зростанням доступності та здешевленням супутникової інформації, з іншого.

ДЗЗ – отримання даних про поверхню Землі й об'єкти, розташовані на ній або в її надрах, в процесі зйомок будь-якими дистанційними (неконтактними) методами шляхом реєстрації датчиками (сенсорами) за допомогою знімальної апаратури наземного, повітряного або космічного базування в одному чи декількох діапазонах електромагнітного спектра.

Аеро- та супутникові методи ДЗЗ ґрунтуються на тому, що будь-який об'єкт випромінює і відбиває електромагнітну енергію відповідно до особливостей його фізичних і геометричних характеристик.

Основним результатом аеро- та супутникового зондування є *знімок* – двовимірне зображення земної поверхні і розташованих на ній об'єктів, отримане за певними законами шляхом реєстрації яскравості об'єктів й інших характеристик електромагнітного випромінювання (ЕМВ), що надходить від них.

Практичне використання навколоземного космосу почалося в XX столітті, перша офіційна згадка про космічну діяльність була в резолюції Генеральної Асамблеї ООН 1721 від 20 грудня 1961 р.

Спостереження із супутникових носіїв завдяки великій висоті польоту, швидкості і регулярності орбітального руху порівняно з традиційними методами дослідження має низку переваг, а саме широкою смугою огляду, високою періодичністю зйомки, можливістю спостереження важкодоступних районів, низькою питомою вартістю зйомки одиниці площі тощо.

По-справжньому широкі перспективи відкрились перед ДЗЗ з розвитком комп'ютерних технологій, переносом усіх основних операцій з обробки і використання даних зйомок на комп'ютери, розробкою програмних комплексів з цифрової обробки зображень, з появою і широким розповсюдженням геоінформаційних систем (ГІС).

ДЗЗ сьогодні – це величезне розмаїття методів одержання зображень практично у всіх діапазонах довжин хвиль електромагнітного спектра – від ультрафіолетового до далекого інфрачервоного і радіодіапазону; найрізноманітніша оглядовість зображень – від знімків з метеорологічних геостаціонарних супутників, що охоплюють практично цілу півкулю, до детальних зйомок ділянки в декілька сотень квадратних метрів.

Сьогодні, завдяки швидким темпам розвитку технологій, можна вести мову вже про мультидисциплінарні методи досліджень, засновані на результатах супутникового знімання. Методи і технології ДЗЗ незамінним інструментом дослідження і постійного моніторингу нашої планети, який допомагає ефективно використовувати й управляти її ресурсами. Сучасний розвиток технологій ДЗЗ розширює сферу їх застосування, охоплюючи усі багатогранні сторони і сфери використання. Наразі дані ДЗЗ успішно використовуються в таких галузях і сферах науки, як геологія, геодезія, океанологія, географія, екологія, картографія, кадастровий облік, сільське господарство, охорона навколишнього середовища, ліквідація надзвичайних ситуацій, транспорт, комунікації, зв'язок, енергетика, промисловість, гарантування безпеки та оборони країни, розвідка тощо.

Завдяки сучасним аеро- та супутниковим зйомкам Землі стало реальним комплексне вивчення земної поверхні і надр, прогнозування запасів природних ресурсів, дослідження стану і змін навколишнього природного середовища (НПС) під впливом техногенезу, організація оперативного моніторингу тощо. І з кожним роком зростає наукове, практичне та пізнавальне значення ДЗЗ.

У взаємодії аеро- та супутникового зондування з науками про Землю спостерігається певна подвійність [71]. З одного боку, ці методи можна віднести до певної конкретної науки, що використовує їх для дослідження свого предмета. Тому цілком правомірна поява таких розділів наук, як супутникова метеорологія, аерофототопографія, космічна океанологія тощо. На основі космонавтики сформувався новий напрямок наук про Землю – *супутникове природознавство*. Матеріали дистанційного зондування (МДЗ) відкрили широкі перспективи для географічних, геолого-геофізичних, гідрологічних, ґрунтових і ландшафтних досліджень, які багато в чому визначили шляхи розвитку тематичної картографії. МДЗ вкрай необхідні для вирішення нагальних завдань метеорології; моніторингу лісів, сільгоспугідь, землекористування, стану технічних об'єктів, територій з активною нафтогазодобувною інфраструктурою; створення земельного кадастру, цифрових карт; територіального планування; геологорозвідки; попередження розвитку надзвичайних ситуацій тощо. Власне, МДЗ вже стали інструментом антикризового управління. Завдяки МДЗ вивчення земної поверхні, уявлення про будову і структуру Землі та навколишніх планет стало більш досконалим, а дослідницька наукова діяльність, що ведеться в надрах та на земній поверхні, – більш продуктивною. З іншого боку, теоретичне узагальнення конкретних додатків сприяє становленню аерокосмічного зондування як самостійної дисципліни, яка має практичне застосування у сферах інших наук [71].

МДЗ за своєю інформативністю є найефективнішими з усіх існуючих інформаційних джерел. Вони надають унікальні можливості одномоментного оперативного збору просторової інформації в глобальному масштабі з високим просторовим, спектральним і часовим розрізненням та відображенням знятої поверхні Землі в різних спектральних діапазонах випромінювання електромагнітних хвиль (ЕМХ), що визначає їх потенціал і перспективи для господарського, наукового та військового застосування. Це дозволяє створювати різні образи земної поверхні, часом навіть несподівані для людини.

Успішний розвиток і діапазон використання супутникових методів у геології дозволив створити новий науковий напрям – супутникову геологію. Супутникові знімки разом з матеріалами традиційних методів дослідження Землі дають надійні дані для побудови геологічних моделей досліджуваних територій. Супутникова геологія широко використовує не тільки МДЗ, але й найсучасніші людино-машинні системи обробки й дешифрування різнорідної цифрової інформації величезного об'єму, методи високоточних вимірів спектральних відбивних характеристик, цифрових записів зображень поверхні Землі, даних геологічного, геохімічного і геофізичного аналізів.

Науково-технічні досягнення останніх десятиліть у галузі створення і розвитку супутникових систем, технологій обробки, збереження, інтерпретації і використання отримуваних даних сприяли розширенню кола вирішуваних завдань. Зросла і кількість споживачів цих даних, вони використовуються не тільки з виробничою і науковою метою, але й у повсякденному житті. Без перебільшення можна стверджувати, що сьогодні ведеться гонка за супутниковий сегмент. Якщо раніше протягом року запускали 7 апаратів цього класу, то сьогодні – близько 18–20, і більшість з них володіє унікальними характеристиками, бо держави, що виходять на ринок супутникових технологій, намагаються подати новизну, якої попередньо не було. При цьому значна частина нових апаратів має комерційне призначення, їх дані доступні широкому загалу споживачів.

Сьогодні індустрія ДЗЗ є одним з найбільш інноваційних секторів економіки, що інтегрує в собі новітні технології супутникової галузі з новітніми досягненнями у галузі обробки даних, їх аналізу й розповсюдження. Використання цієї технології докорінно змінить управління природними ресурсами, контроль стану довкілля і його захист, а також гарантування національної безпеки держави.

Вирішення багатьох господарських проблем сьогодні вже неможливе без застосування МДЗ, основна мета яких – одержання з них корисної інформації, яка використовується для пошуку корисних копалин, складання топографічних і тематичних карт, інвентаризації земель, екологічного моніторингу територій, дослідження динаміки природних і антропогенних об'єктів та явищ, створення оперативних і прогнозних карт, метеорологічних прогнозів тощо. Наприклад, прогнозування урожайності сільськогосподарських культур у США та інших високорозвинених країнах світу здійснюється головним чином на підставі оцінки посівів за МДЗ Землі, прогноз погоди – за матеріалами космічного дослідження атмосферних процесів і явищ; земельні, геоінформаційні та кадастрові системи широко використовують аеро- та супутникові знімки для поповнення та актуалізації просторових і атрибутивних даних; спостереження за динамікою льодовиків і сніжного покриву проводиться за матеріалами супутникових зйомок; картування рельєфу, ґрунтів, лісів ведеться з використанням супутникових знімків; глобальну картографію (наприклад, система Google Earth) неможливо уявити без МДЗ.

Супутникові системи ДЗЗ і видового спостереження стали необхідним компонентом інформаційної інфраструктури сучасної держави. Одночасно склався й інтенсивно розвивається світовий ринок геоданих та МДЗ. Зростають продажі, розроблюються нові технології аеро- та супутникової зйомки й обробки МДЗ,

розширюються галузі застосування геоданих. Зросла зацікавленість до геопорталів та інших web-сервісів, що використовують МДЗ. Якщо у 2008 р. їх нараховувалось близько десяти, то зараз – понад сотні. Це не тільки всесвітньо відомі web-ресурси, такі як Google Earth або Bing Maps, а й корпоративні портали, що створюються для розв'язання завдань регіонального управління, сільського і лісового господарства, моніторингу НПС, в інтересах військової розвідки та оборони.

Бурхливий прогрес прикладних супутникових технологій у поєднанні з розвитком телекомунікацій, електронної техніки, комп'ютерних мереж, засобів обробки інформації, методів керування базами даних і спеціалізованого програмного забезпечення став каталізатором того, що за останні 30 років технології ДЗЗ відкрили їх реальну ефективність, а використання їх результатів перестало бути винятковим правом вузького кола військових відомств, установ державного управління і привілейованих наукових організацій. Наприклад, якщо у 1974 р. в колишньому СРСР МДЗ застосовували усього 8 організацій, то вже у 1991 р. їх кількість становила 1300. І з кожним роком ця цифра зростає. Щодня засоби ДЗЗ надають тисячі знімків з різних джерел – від простих чорно-білих фотографій до гіперспектральних зображень.

Передумови такого стрімкого зростання використання методів ДЗЗ зумовлені:

– значним збільшенням обсягів якісних даних супутникового моніторингу, зокрема підвищенням просторового, радіометричного та часового розрізнення;

– появою ефективних технологій збереження та розповсюдження супутникових даних як на комерційній, так і на безоплатній основі;

– інтенсивним розвитком інструментальних програмних технологій інтелектуальної тематичної обробки МДЗ з використанням методів математичного моделювання;

– розвитком математичних методів та алгоритмів цифрової обробки супутникових знімків для різних прикладних сфер і галузей;

– розвитком програмно-технічних засобів презентації результатів інтелектуальної обробки супутникових знімків кінцевим споживачам моніторингової інформації.

Розвиток орбітальної техніки дозволяє створювати нові картографічні ГІС, автоматизовані комплекси управління природокористуванням і моніторингу екологічного стану в окремих регіонах і на планеті в цілому.

На сучасному етапі зросла економічна ефективність застосування супутникової інформації за рахунок використання прогресивних технологій обробки й інтерпретації супутникових зйомок.

Ефективність використання МДЗ для розв'язання наукових і практичних завдань безпосередньо в прямій залежить від їх якості. Тому важлива роль у загальній системі одержання якісних МДЗ належить процесам об'єктивного контролю та оцінки характеристик якості вихідних аеро- та супутникових знімків та похідної продукції. За результатами такої оцінки розробляються рекомендації

з подальшого використання МДЗ, які забезпечують гарантію їх якості та підвищення конкурентоспроможності.

Ринок збуту МДЗ щороку зростає в середньому на 20 %. Експерти передбачають бум на цьому ринку: в найближче десятиліття на навколоземних орбітах перебуватиме щонайменше 170 космічних апаратів.

Основним напрямом у розробці ДЗЗ буде створення і запуск супутникових апаратів з надвисокою розрізненністю. Підвищення цього показника, прогрес у створенні новітньої обчислювальної техніки, засобах зв'язку та інтернету визначать тенденції розвитку ДЗЗ як принципово нової інформаційної технології.

Для розуміння і правильного використання МДЗ споживачу та досліднику необхідні щонайменше мінімальні знання основ техніки зйомки і, передусім, знання залежностей спектральних яскравостей об'єктів, що його цікавлять, від частоти електромагнітного випромінювання (ЕМВ), величин відбиття, поглинання, пропускання, розсіювання ЕМХ обраного діапазону на поверхні об'єкта і в атмосфері, а також проявів цих процесів у різних ландшафтних зонах для різних об'єктів. Потрібно враховувати природні і техногенні перешкоди, що виникають при зйомці, які викривлюють спектральні сигнали об'єктів, а іноді й повністю їх маскують.

ДЗЗ як наукова дисципліна вивчає просторово-часові властивості і відношення геооб'єктів, що проявляються прямо або опосередковано у варіаціях власного або відбитого випромінювання.

Сьогодні не існує загальноприйнятої класифікації наукових і соціально-економічних завдань, під час роз'язання яких використовуються ДЗЗ. Незважаючи на це, спектр таких завдань надзвичайно широкий і включає оперативний моніторинг природних ресурсів, дослідження динамічних процесів на суші, в океанах і в атмосфері, збір метеорологічної інформації, моніторингу надзвичайних ситуацій, військову розвідку тощо.

Супутникова зйомка являє собою постійно оновлюване джерело точної, неупередженої інформації, яке може допомогти споживачам, управлінцям і організаціям приймати правильні оперативні та ефективні управлінські рішення.

МДЗ надають можливість створити детальну базу для картографування й інвентаризації транспортної інфраструктури: доріг, залізничних магістралей, водних каналів, аеропортів і портів, а також для планування ремонтних робіт.

МДЗ дають можливість державним установам та організаціям отримувати базу для оновлення регіональних карт в інтересах планування і моніторингу міських територій. Муніципальні органи, працюючи над плануванням міської інфраструктури, можуть отримати можливість обрати найбільш економічний і безпечний для навколишнього середовища спосіб використання природних ресурсів.

Супутникові зображення є невід'ємним елементом місцевого і регіонального планування, широко застосовуються в картографії, землекористуванні, управлінні водними ресурсами, податковому управлінні.

Однією зі сфер використання ДЗЗ є геологія (пошук нафти, природного газу, мінералів тощо). Космічні зображення використовуються на стадії геологорозвідувальних робіт для оцінки покладів природних ресурсів і стану розроблюваного шару.

Величезна роль у ДЗЗ відводиться створенню електронних топографічних карт усієї лінійки масштабів, при цьому інформація, що отримується за допомогою МДЗ, дозволяє оперативно оцінювати динаміку змін, що відбуваються на певній території, й оперативно оцінювати ці зміни, проводити актуалізацію даних баз даних ГІС тощо. Світова практика вже сьогодні нараховує приблизно 140 господарсько-економічних і спеціальних завдань, що розв'язуються аерокосмічними засобами і методами ДЗЗ. Серед них виділяють дев'ять основних напрямків використання інформації ДЗЗ [26].

1. Сільське господарство:

– інвентаризація сільськогосподарських угідь;
– ідентифікація різних типів сільськогосподарських культур;
– сільськогосподарське ґрунтознавство;
– сільськогосподарська гідрологія;
– сільськогосподарська метеорологія;
– запобігання сільськогосподарським катастрофам;
– прогнозування врожаїв і аналіз сільськогосподарського потенціалу тощо.

2. Кліматологія, моніторинг глобальних атмосферних явищ:

– вимір концентрації газів, що викликають парниковий ефект;
– моніторинг вмісту озону в атмосфері Землі;
– дослідження радіаційного балансу Землі;
– вимір сонячної сталої;
– вимір температури поверхні Землі і моря;
– моніторинг вмісту аерозолів у земній атмосфері;
– моніторинг забруднення земної атмосфери;
– спостереження за формуванням і переміщенням хмар (циклонів, тайфунів);
– вимір вертикального профілю температури в атмосфері;
– спостереження моніторингової активності;
– оцінка вологості атмосфери.

3. Пошук корисних копалин і енергоносіїв:

– пошук нафти, природного газу і вугілля;
– геологорозвідувальні роботи оглядового масштабу;
– геологорозвідувальні роботи регіонального масштабу;
– одержання інформації, необхідної для будівництва гідроелектростанцій.

4. Землекористування:

– топографічне картографування;
– спостереження за зростанням населених пунктів;
– спостереження за пасовищами, розподілом і міграцією тварин;
– створення земельних кадастрів.

5. Моніторинг стану морів і океанів:

– моніторинг розвитку фітопланктону;
– дослідження механізмів глобального теплообміну в океанах;
– дослідження океанських ресурсів;
– виявлення джерел забруднення океану.

6. Лісове господарство:

– моніторинг стану лісів;

– визначення типів лісонасаджень і домінуючих порід;

– оцінка запасів лісоматеріалів;

– картографування лісів і вимір площ;

– кількісна оцінка біомаси;

– лісівництво;

– дослідження водного режиму лісових масивів.

7. Моніторинг водних ресурсів:

– аналіз взаємодії льоду й атмосфери;

– вимір температури і товщини льоду;

– виявлення і класифікація областей снігового покриву;

– визначення характеристик снігового покриву;

– визначення водного еквіваленту снігу;

– непряме (опосередковане) виявлення ґрунтових вод, окреслення водних шарів;

– моніторинг повеней;

– моніторинг якості води.

***8. Моніторинг надзвичайних ситуацій*:**

– попередження, моніторинг і оцінка наслідків повеней, затоплень і підтоплень;

– організація інформаційного забезпечення при виникненні надзвичайних ситуацій (землетруси, пожежі, повені, смерчі, тайфуни).

***9. Видова військова розвідка*:**

– моніторинг військових баз, портів і аеродромів потенційних супротивників;

– виявлення цілей для завдавання ударів;

– виявлення скупчення і місць дислокації потенційного супротивника;

– виявлення місць розташування стратегічної зброї.

Предметом ДЗЗ як наукової дисципліни є розгляд просторово-часових властивостей і відношень природних та соціально-економічних об’єктів, що проявляються прямо або опосередковано у власному чи відбитому випромінюванні, яке реєструється дистанційно з космосу або з повітря у вигляді двомірного зображення – знімка.

Фахівцю, що обробляє і (або) використовує МДЗ, необхідні глибокі знання як фізичних основ усього комплексу методів, так і фізичних та технічних особливостей кожного з них окремо. Крім того, він повинен мати уявлення про обмеження застосування того чи іншого методу. Автор сподівається, що посібник сприятиме одержанню такої інформації, а також, як можна використовувати різні технології ДЗЗ на сучасному рівні їх можливостей.

Для подальшого розвитку наук про Землю, супутникового природознавства і картографування, пошуку корисних копалин, удосконалення землевпорядкування та кадастрової справи, впровадження ГІС в Україні важливим чинником є підготовка фахівців у зазначених галузях та підвищення їх кваліфікації.

Основною метою посібника є:

– надання необхідних відомостей про фізичні основи і методи аеро- та супутникових досліджень, види аеро- та супутникової зйомки, властивості і

класифікацію аеро- та супутникових знімків, способи їх дешифрування й основні напрямки використання аеро- та супутникових методів;

– набуття практичних навичок роботи зі світовим фондом аеро- та супутникових знімків і їх візуального та комп'ютерного дешифрування в лабораторних і польових умовах.

Для інтерпретації й обробки МДЗ необхідні певні навички. Раніше їх можна було отримати, тільки пройшовши спеціалізований курс навчання. Зараз ситуація змінюється як у зв'язку з удосконаленням програмного забезпечення, так і в зв'язку з підвищенням рівня загальної підготовки потенційних обробників знімків. Покращення рівня загальної підготовки буде тривати. У майбутньому інтерпретація супутникових знімків і просторовий аналіз на їх основі можуть стати поширеним умінням, аналогічно комп'ютерній грамотності.

Пропонована друга редакція посібника призначена для студентів вищих навчальних закладів, що вивчають науки про Землю. В посібнику викладено відомості про принципи отримання просторової інформації за МДЗ, сучасні технічні засоби для проведення зйомок, методики, алгоритми та технології обробки МДЗ.

I. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДИСТАНЦІЙНІ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Іноді корисно від'їхати подалі, щоб розгледіти те,
що постійно знаходиться в тебе перед очима.
Леонід Філатов

МДЗ використовують для розв'язання різних завдань дослідження земної поверхні (пошуку корисних копалин, моніторингу природних ресурсів, складання топографічних карт, створення метеопрогнозів тощо). За знімками, одержаними з аеро- та космічних носіїв, виготовляються карти і плани, які використовуються в земельному кадастрі і землеустрої, картографії і ГІС, управлінні територіями, пошуку корисних копалин, визначаються геодезичні координати зображуваних точок місцевості, межі досліджуваних об'єктів, їх належність до відповідного класу, їх якісні характеристики тощо.

1.1. Загальні відомості про дистанційні дослідження

Для забезпечення можливості дослідження будь-якого об'єкта потрібно мати інформацію про нього. В загальному випадку існує два методи отримання вихідної інформації про об'єкти: *контактний* та *дистанційний*.

Контактний метод – це спостереження (*in situ* лат. – на своєму місці), ***коли вимірювальний пристрій вводиться або безпосередньо в об'єкт, або торкається поверхні об'єкта.***

Схему контактного одержання інформації подано на рис. 1.1.

Рис. 1.1. *Приклад одержання інформації за допомогою контактних методів*

Контактні методи одержання інформації засновані на безпосередньому контакті вимірювального пристрою з досліджуваним об'єктом. Проте слід пам'ятати:

– по-перше, оскільки поле об'єкта вимірювання спотворюється при введенні в нього вимірювального пристрою то дані вимірювання завжди відрізняються від істинного значення вимірювальної величини об'єкта;

– по-друге, верхня межа вимірювання обмежена властивостями матеріалів, з яких виготовлені вимірювальні пристрої;

– по-третє, низка завдань вимірювання у недоступних об’єктах та об’єктах, що рухаються, не можуть бути розв’язані контактним способом.

Контактним засобам вимірювання температури властиві похибки, обумовлені, зокрема, зміною температури об’єкта внаслідок зміни його температурного поля внесеним термоприймачем, а також неминучим відведенням чи припливом тепла, обумовленим різницею температур термоприймача й об’єкта в результаті теплообміну термоприймача з навколишнім середовищем.

Прикладами контактних методів вимірювання можуть слугувати дрейфуючі буї, що здійснюють виміри температури морської поверхні, вивчають характер циркуляції вод у верхньому шарі моря, безпосередній вимір температури тіла за допомогою термометра, вимір тиску, вологості тощо.

Дистанційний метод (від лат. *distantia* – відстань, дистанція) ***– це спостереження за об’єктом (процесом, явищем), що здійснюється за допомогою пристрою, який знаходиться на відстані від об’єкта без безпосереднього контакту з ним.***

До дистанційних методів одержання інформації відносяться рисовані зображення місцевості та всі методи одержання інформації про об’єкт (процес, явище) за допомогою датчиків (сенсорів), які не перебувають у безпосередньому фізичному контакті з ним[1] (рис. 1.2).

Рис. 1.2. *Дистанційні методи*

Умовно до дистанційних методів також відносять контактні способи вимірів, наприклад, прилади для дослідження навколоземного космосу шляхом селекції космічних часток і безпосередніх вимірів параметрів магнітосфери та іоносфери Землі, а також радіотехнічні прилади (приймачі), що дозволяють збирати інформацію про контактні виміри температури, вологості, тиску й інших

[1] Це твердження, якщо підходити строго, є хибним, оскільки без будь-якого контакту вимірювання було б неможливе.

метеопараметрів приземної атмосфери, що здійснюються і передаються автоматичними мобільними або нерухомими наземними станціями (буями).

Схему дистанційного одержання інформації наведено на рис. 1.3.

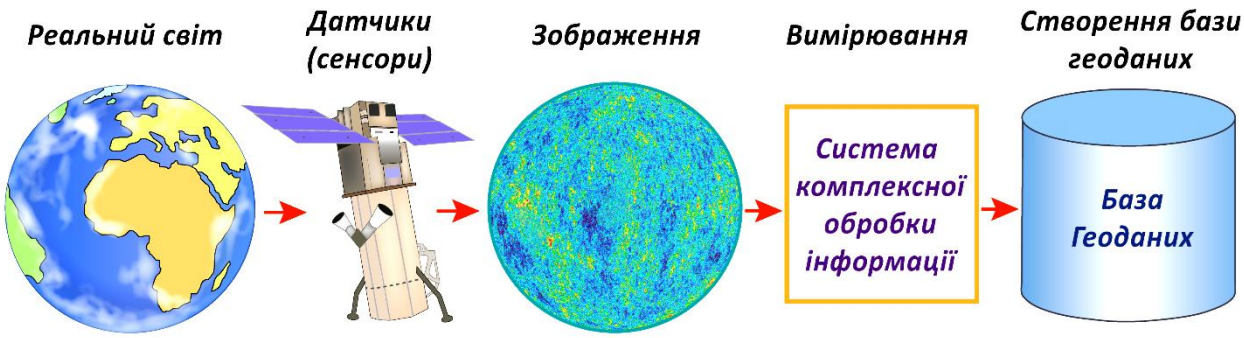


Рис. 1.3. *Схема одержання інформації за допомогою дистанційних методів*

1.1.1. Дистанційні спостереження за допомогою органів чуття

Для спостереження і дослідження навколишнього природного середовища (НПС) людина використовує *органи чуття*. Запах, смак, дотик дозволяють оцінювати якість середовища через нейрофізичні реакції на гази, рідини і тверді тіла, з якими вона контактує. Чуття, що сприймаються безпосередньо органами зору і слуху, дають уявлення про більш віддалені об’єкти відповідно до їх випромінювання електромагнітної або акустичної енергії. Дотик, що проявляє себе через чутливість людської шкіри до тепла, також дозволяє робити певні висновки про віддаленість об’єктів. Така оцінка органами чуття людини деяких джерел енергії, що знаходяться на певній відстані від неї, є *природною формою дистанційних досліджень*.

Особливу роль у дистанційному одержанні інформації про об’єкти та явища відіграє людський зір. Головними компонентами зорових дистанційних спостережень є око і мозок людини. Проте людина бачить не очима, а за допомогою очей, звідки інформація передається через зоровий нерв, хіазму, зорові тракти в певні зони потиличних часток кори головного мозку, де формується та картина зовнішнього світу, яку ми й бачимо. Всі ці органи і складають наш зоровий аналізатор, або зорову систему.

Видима енергія у формі світла, що випромінюється або відбивається освітленим об’єктом, уловлюється світлочутливими клітинами ока, які зоровим нервом пов’язані з високошвидкісним пристроєм обробки даних, що працює у реальному масштабі часу (тобто практично миттєво), – мозком. Ліве око і праве розташовані одне від одного на відстані приблизно шести сантиметрів, тобто людина бачить предмети кожним оком під різними кутами. Наявність двох очей дозволяє зробити наш зір *стереоскопічним* (тобто формувати тривимірне зображення). Правий бік сітківки кожного ока передає через зоровий нерв "праву частину" зображення в правий бік головного мозку, аналогічно діє й лівий бік сітківки. Потім ці дві

частини зображення – праву й ліву – головний мозок з'єднує в одне, синтезуючи їх і подаючи у формі зорового образу.

Око людини відчуває як інтенсивність прийнятої енергії, так і частоту хвилеподібних коливань ЕМВ. Завдяки цьому людина розрізняє інтервали яскравості (світлості) і колірне забарвлення. Початкове уявлення про світлість і кольоровість можна проілюструвати, помістивши пофарбовану поверхню частково на пряме сонячне світло, а частково – у тінь. Обидві частини її мають однакову кольоровість, але різну освітленість. Сукупність цих характеристик і позначається терміном "колір".

Мозок виконує також роль певного банку даних, у якому зберігаються попередньо створені образи. Проте зберігаються вони тут лише короткий час, помітно втрачаючи при цьому точність і визначеність. Незважаючи на це, за допомогою уявних порівнянь, наприклад спостережуваного в даний момент зображення і певних образів, отриманих у минулому, може відбуватись якісно-структурне порівняння інформації.

Людські уявлення про об'єкти та явища реального світу можуть змінюватись за допомогою простих технічних засобів – оптичних лінз, що виправляють дефекти зору, селективних фільтрів – світлозахисних окулярів для послаблення сонячного світла або хімічних речовин – наркотиків, що впливають на характер сприйняття.

Незважаючи на те, що природна система дистанційних спостережень "око – мозок" досить непогано пристосована до оцінки характерних особливостей навколишнього середовища, однак вона не спроможна задовольнити усі вимоги щодо покращення характеристик дистанційних спостережень.

По-перше, людські датчики (сенсори) мають відносно обмежені експлуатаційні характеристики, зокрема із сприйняття електромагнітного спектра.

По-друге, нездатність тривалої реєстрації спостережуваних образів у мозку, яка б забезпечувала дослідника можливістю докладного дослідження особливостей об'єкта (процесу, явища).

По-третє, недосконала система виклику образів із пам'яті не дозволяє з високою точністю і детальністю порівнювати образи, що були занесені до пам'яті людини в різні моменти часу.

По-четверте, неможливість за потреби відтворювати ретроспективні дані з різною швидкістю, оскільки найчастіше природні явища краще піддаються дослідженню в динаміці або шляхом уповільненого відтворення зафіксованих даних.

По-п'яте, неможливість автоматичного ("об'єктивного") аналізу спостережень, яке б дозволяло мінімізувати вплив індивідуальних особливостей спостерігача (психологічних, нейрофізичних та кваліфікаційних).

По-шосте, відсутність засобів посилення зображень, які б дозволяли виявляти або підкреслювати певні явища.

Саме тому людина була змушена створювати різноманітні технічні засоби, які розширюють її природні можливості щодо дистанційних спостережень.

1.1.2. Дистанційні спостереження за допомогою технічних пристроїв

Завдяки винаходу і поступовому вдосконаленню різноманітних спеціальних технічних приладів людині вдалось суттєво розширити свої обмежені природою здатності щодо дистанційних спостережень. Оскільки цих приладів є дуже багато, то зосередимо свою увагу головним чином на фізичних явищах, на яких вони засновані.

Електромагнітна енергія. ЕМВ[2] відноситься до найважливіших посередників при дистанційних спостереженнях НПС. Бувши єдиною формою переносу енергії у відкритому космосі, ЕМВ відрізняється великим розмаїттям властивостей і проявів. Значення ЕМВ в ДЗЗ настільки велике, що деякі автори навіть не вважають за потрібне згадувати про інші явища [85].

Акустична енергія. Акустичне зондування водних поверхонь – це відомий і перевірений спосіб вимірювання глибин. Зазвичай ехолот, що використовується з цією метою, посилає в певному напрямку короткоімпульсні акустичні сигнали, а відбиті або розсіяні сигнали, що повертаються, сприймаються й інтерпретуються в показники глибин океану і характеристик морського дна (рис. 1.4).

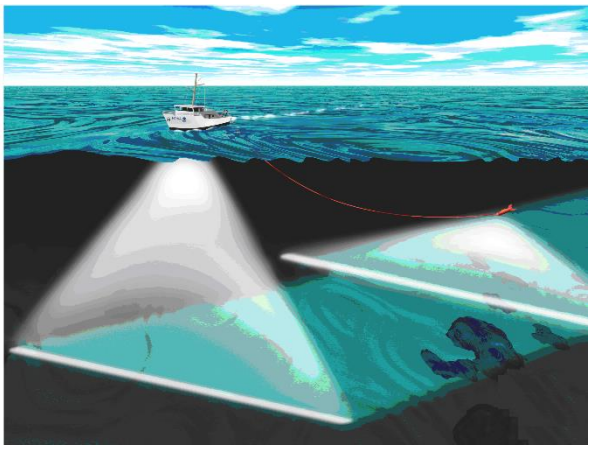


Рис. 1.4. *Схема одержання інформації за допомогою ехолотів*

За допомогою акустичних приладів можна досліджувати й атмосферу, зокрема поле вітру і стратифікацію температури (зміну температури з висотою). Однак порівняно з ЕМХ акустичні хвилі мають менший робочий діапазон і сильніше взаємодіють з атмосферою; до того ж їх менша швидкість розповсюдження може слугувати причиною похибок вимірювань. Це, зокрема, зменшує реальні можливості застосування акустичних приладів при дослідженні атмосфери. Однак, враховуючи простоту експлуатації і значно менші витрати на експлуатацію

[2] **Електромагнітне випромінювання (ЕМВ)** – взаємопов'язані коливання електричного (Е) і магнітного (В) полів, що утворюють електромагнітне поле. Розповсюдження випромінювання здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль. Електромагнітне випромінювання є потоком фотонів, який тільки при великій їх (фотонів) кількості можна розглядати як неперервний процес.

акустичних приладів, є надія, що вони будуть удосконалені і в майбутньому можуть знайти застосування в дистанційних дослідженнях.

Гравітаційне поле. Навколо Землі існує поле тяжіння, зумовлене її масою, яке отримало назву *гравітаційного*. Сила тяжіння притаманна як малим, так і великим тілам. Чим більша маса тіла, тим потужніше його гравітаційне поле. Біля поверхні Землі його середнє значення становить близько 9,8 м/с^2. З висотою напруженість поля зменшується. Теоретично гравітаційне поле Землі поширюється до безкінечності. Ближче до поверхні Землі сила тяжіння набуває дещо іншого характеру. Тут проявляються сили, які не тільки притягують, а й відштовхують тіла, що знаходяться на поверхні Землі. Відштовхувальна сила зумовлена обертанням Землі навколо своєї осі і називається відцентровою. Рівнодіюча двох сил – гравітаційної та відцентрової – називається *силою тяжіння*.

Визначається сила тяжіння масою тіл. Маса, власне, і є сила, з якою тіла притягаються в напрямі до центра Землі. Сила тяжіння утримує тіла і предмети на поверхні Землі, а гравітаційне поле утримує на відстані супутник Землі – Місяць.

Розподіл величини сили тяжіння на поверхні Землі залежить від географічної широти: зі збільшенням широти вона зростає. Зменшення сили тяжіння в напрямі до екватора пояснюється двома причинами: збільшенням у цьому напрямку відцентрової сили і збільшенням відстані від центра планети, а також особливостями її внутрішньої будови. Якби Земля була правильною нерухомою кулею, за складом однорідною від поверхні до центра, то її сила тяжіння скрізь була б однаковою і спрямованою до центра планети.

На полюсах, де відцентрова сила практично відсутня, а відстань до центра Землі найменша, сила тяжіння найбільша і становить 9,83 м/с^2. На екваторі відцентрова сила і відстань найбільші, тому сила тяжіння найменша – 9,78 м/с^2.

Вплив гравітаційного поля на розвиток планети та її географічну оболонку величезний. Сила тяжіння визначає справжню форму земної поверхні – геоїд, зумовлює рухи земної кори. Під її впливом відбувається переміщення пухких гірських порід, мас води, льоду, повітря. Гравітаційне поле Землі є однією з причин кругообігів у літосфері, атмосфері і гідросфері.

Саме ж гравітаційне поле зумовлене, як уже було зазначено, масою Землі. Підраховано, що повна маса Землі становить 5,976 10^{27} г. Безпосередньо цю масу виміряти неможливо, але розрахувати її порівняно просто за формулою гравітаційного тяжіння:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},$$

де G – гравітаційна стала, яка дорівнює 6,67384·10^{-11} м^3·кг$^{-1}$·с$^{-2}$ або Н м^2/кг^2;
m_1, m_2 – маси тіл, що притягаються, кг;
R – відстань між центрами тіл, м.

Земний магнетизм. Земля – це величезний сферичний магніт. Хоча про наявність у планети магнетизму людям стало відомо давно, а вивченням його

властивостей займаються вчені різних країн світу, в природі її магнітного поля багато ще залишається нез'ясованим.

З багатьох теорій, які були висунені для пояснення походження магнітного поля Землі, найбільш популярною нині є теорія динамо. Згідно з нею Земля є скоріше електромагнітом, ніж постійним магнітом: електричний струм, що якимось чином генерується внаслідок турбулентної конвекції в рідкому ядрі, утворює навколо себе поле однорідного намагнічування, або постійне поле. Нез'ясованим залишається питання про джерело енергії, яке викликає конвекцію в земному ядрі, де дуже мало або зовсім немає радіоактивних елементів. Допускають три варіанти: 1) на межі між внутрішнім і зовнішнім ядром відбувається поступова кристалізація заліза з виділенням тепла; 2) внаслідок опускання заліза з мантії вниз вивільняється гравітаційна енергія; 3) тепло виділяється при фазових змінах речовин, що відбуваються внаслідок гіпотетичного розширення Землі.

Магнітне поле Землі досягає висоти 80–90 тис. км від її поверхні. До висоти 44 тис. км магнітне поле постійне, його величина зменшується з віддаленням від земної поверхні поступово. На висоті від 44 до 90 тис. км магнітне поле змінне, залежно від знаку воно захоплює й утримує електрони або протони. Сфера навколоземного простору, в якому знаходяться заряджені частини, захоплені магнітним полем Землі, має назву *магнітосфера*.

Будова магнітосфери Землі, тобто навколишнього простору, фізичні властивості якого визначаються магнітним полем Землі та його взаємодією з потоком заряджених частинок сонячного вітру, в минулому уявлялася досить простою. Вважалося, що магнітосфера утворює симетричний диполь. Але вже перші прямі вимірювання магнітних полів, які були зроблені безпосередньо у космосі, не підтвердили цю гіпотезу. Виявилося, що магнітосфера Землі вкрай асиметрична: з боку Сонця магнітне поле сильно стиснуте, а з протилежного боку – навпаки, дуже витягнуте й утворює довгий, до 1 млн км, магнітосферний хвіст. Це є наслідком обтікання магнітосфери сонячним вітром. При цьому тут, залежно від тиску сонячного вітру, границя магнітосфери з боку Сонця – магнітопауза – то наближається до Землі (при зростанні тиску), то віддаляється (при його послабленні). Плазма сонячного вітру обтікає магнітосферу Землі з надзвуковою швидкістю, внаслідок чого перед магнітосферою утворюється ударна хвиля, яка відокремлена від магнітопаузи перехідною областю.

Магнетизм являє собою силу, з якою певні мінерали і Земля, що складається з них, притягує інші. Магнітні властивості таких мінералів дають можливість за допомогою геомагнітних зйомок відшукувати їх промислові запаси. В результаті повільних змін у магнітному полі Землі магнітні полюси змінюють протягом часу своє місце розташування. Більш хаотичні порушення магнітного поля Землі викликають коливання в інтенсивності "сонячного вітру" – потоку заряджених частинок, породжених Сонцем. З цим пов'язані "магнітні бурі", які в свою чергу створюють перешкоди для радіозв'язку, а також полярні сяйва. Такі збурювання магнітного поля реєструються магнітометрами, і за їх показами можна судити про зміни стану Сонця.

Розбіжності між магнітним і гравітаційним полями полягають у наступному. По-перше, магнітне поле – вихрове, а гравітаційне – ні. Для гравітаційного поля є джерело поля, для магнітного поля таке джерело відсутнє (принаймні поки не виявлено). Тому силові лінії гравітаційного поля є незамкненими, а магнітного – замкнені. Як наслідок, гравітаційне поле – потенційне, магнітне – ні. Робота з переміщення "гравітаційного заряду", тобто будь-якої маси по замкнутій траєкторії дорівнює нулю. Для магнітного: робота з переміщення елементарного провідника зі струмом по замкнутому контуру у загальному випадку нулю не дорівнює. По-друге: гравітаційна взаємодія – це завжди притягання. Не існує "від'ємної маси". Магнітна взаємодія може бути і тяжінням, і відштовхуванням.

1.1.3. Методи дистанційних спостережень

Зазвичай розрізняють "*активні*" і "*пасивні*" методи дистанційних спостережень. В останньому випадку пристрій реєстрації фіксує енергію або силу, що виходить або від самого об'єкта спостережень, або від "третього" джерела. Активні системи дистанційних спостережень працюють на принципі реєстрації сигналів, які створені штучно. Генеровані в контрольованих умовах, ці сигнали дозволяють встановлювати багато характеристик об'єктів і (або) середовища, на які вони "націлені".

Відомим прикладом активної системи, що використовує ЕМВ, слугує *радар*; активної системи, що використовує акустичну енергію, – *сонар*.

Для одержання інформації за допомогою ДЗЗ головним чином використовується ЕМВ шляхом його реєстрації з подальшою його обробкою й аналізом. Електромагнітне випромінювання характеризується інтенсивністю, спектральним складом, поляризацією і напрямком розповсюдження. Ці параметри залежать від стану, властивостей, просторового положення об'єкта дослідження.

Оскільки ДЗЗ – це непрямий метод отримання інформації про те, що розташовано на земній поверхні, в її надрах або в атмосфері, то для отримання змістовної інформації із зібраних даних потрібні спеціальні методи обробки цих даних – дешифрування (інтерпретація) даних.

Застосування МДЗ дає можливість відстежувати зміни НПС умов великих регіонів, стихійних лих і катастроф, здійснювати пошук корисних копалин, моніторинг природних ресурсів, наслідки антропогенного впливу, що мають глобальний характер, наприклад, скорочення площі тропічних лісів, опустелювання багатьох регіонів тощо.

Завдяки чіткій фіксації особливостей стану НПС МДЗ можуть виконувати ревізійну й інвентаризаційну роль. Для такого використання знімків істотне значення має створення системи еталонів зображення різних видів антропогенного впливу на НПС. Так, наприклад, були зроблені супутникові знімки на території радіаційного забруднення в районі Чорнобильської АЕС, а потім складено карти радіаційного забруднення регіону (рис. 1.5).

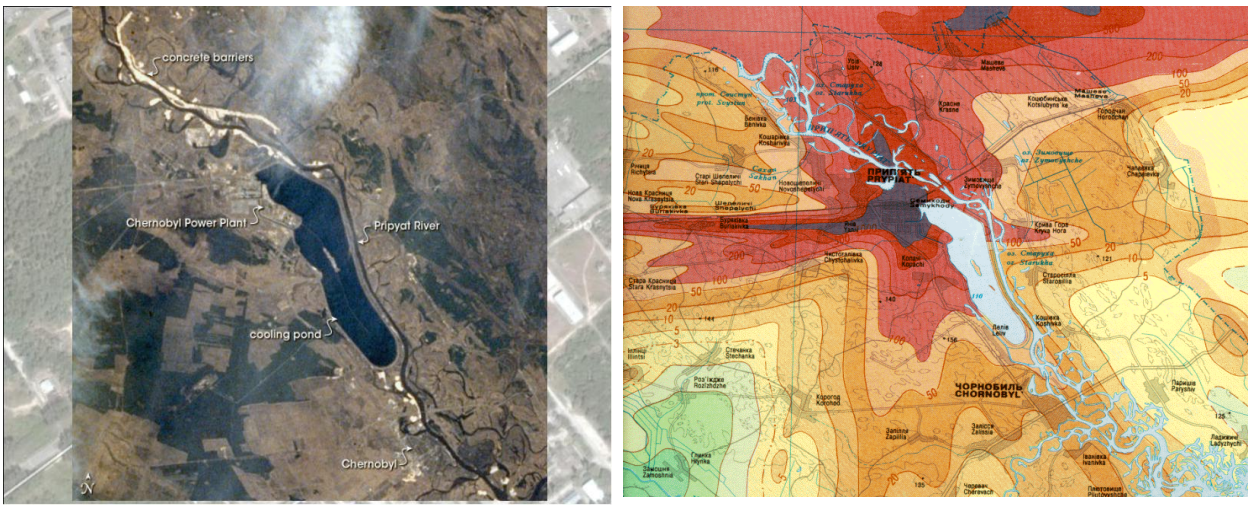


Рис. 1.5. *Супутникові знімки Чорнобильської АЕС та створені за ними карти радіаційного забруднення регіону*

1.2. Необхідність застосування дистанційних методів зондування

Історично одним з найбільш розвинених способів одержання інформації про об’єкти земної поверхні стала *наземна зйомка* (збір інформації "в полі"). Однак суцільне вивчення значних за площею територій методами наземної зйомки вимагає величезних економічних і часових витрат. Крім того, при наземних дослідженнях вкрай складно домогтися синхронності, одночасності спостережень на всіх ділянках території адміністративного регіону або країни. Проблема додатково ускладняється, якщо територія дослідження має складний рельєф або є важкодоступною. ДЗЗ цих недоліків позбавлені.

Дистанційними методами вивчаються природні об’єкти, розташовані на поверхні Землі або у приповерхневому шарі. Для цього широко застосовується аеро- та космічна зйомка.

Метою ДЗЗ є створення та оновлення картографічних матеріалів, пошук корисних копалин, прогноз погоди, моніторинг земельних і лісових ресурсів, екологічного стану, нафто- і газопроводів, збір військової розвідки тощо.

Важливою особливістю аеро-, і особливо космічної, зйомки є те, що вони забезпечують реєстрацію зображень значних територій, що надає можливість аналізувати не лише просторовий розподіл великої кількості об’єктів, оцінювати їхнє відносне розташування, вивчати взаємний вплив об’єктів та НПС, але й оцінювати певні фізичні характеристики зазначених об’єктів. Це сприяє вивченню об’єкта у контексті його оточення [72].

Додатковою перевагою ДЗЗ є можливість систем видавати дані в цифровому форматі, які можуть безпосередньо вводитись у комп’ютер для подальшої спеціальної обробки.

Крім перерахованих, до переваг ДЗЗ можна віднести такі:

– *об'єктивність* – кожний космічний знімок є документом, який об'єктивно відбиває стан місцевості на момент зйомки. Підробити космічний знімок практично неможливо, оскільки космічну зйомку ведуть різні компанії-оператори і спроби змін даних легко виявляються;

– *актуальність* – матеріали супутникової зйомки можна одержати на різні дати, в тому числі можлива зйомка на замовлення, що здійснюється зазвичай протягом декількох тижнів;

– *масштабність* – сучасні прилади ДЗЗ дозволяють одночасно проводити зйомку на значних за площею територіях з досить високим ступенем розрізненності (деталізації);

– *екстериторіальність* – ділянки зйомки не прив'язані до державних і територіальних кордонів, і для проведення зйомки дозвіл не потрібен;

– *доступність* – сьогодні навіть дані ДЗЗ з високим і надвисоким просторовим розрізненням (менше 1 м) є "*відкритими*", а процедура замовлення і їх одержання відносно простою.

ДЗЗ з космосу *(remote sensing of the Earth from space)* ***– отримування даних про Землю з космосу, використовуючи властивості ЕМХ, що випромінюються, відбиваються, поглинаються чи розсіюються об'єктами зондування [13].***

Дані ДЗЗ – це зареєстровані сигнали ЕМВ, отримані за допомогою віддалених носіїв у результаті зйомки з борту авіаційної (літаків, аеростатів, гелікоптерів, безпілотних апаратів) або космічної техніки (ракети, космічні апарати (КА), космічні кораблі (КК) і станції) про поверхню Землі та об'єкти на ній, атмосферу, океан, верхній шар земної кори неконтактними методами [13].

Загальною фізичною основою ДЗЗ є функціональна залежність між зареєстрованими параметрами власного або відбитого випромінювання об'єкта і його біогеофізичними характеристиками та просторовим положенням.

Реєструватися може як власне, так і відбите випромінювання об'єктів з інших джерел. Джерелами випромінювання можуть бути або Сонце, або сама знімальна апаратура. В останньому випадку використовується когерентне випромінювання[3] (радари, сонари і лазери), які дозволяють реєструвати не тільки інтенсивність випромінювання, а й його поляризацію[4], фазу і доплерівський зсув, що надають додаткову інформацію про об'єкти зондування.

[3] У фізиці **когерентністю** називається корельованість (узгодженість) декількох коливальних або хвильових процесів у часі, що проявляється при їх додаванні. Коливання когерентні, якщо різність їх фаз постійна у часі і при додаванні коливань утворюється коливання тієї ж частоти. Класичний приклад двох когерентних коливань – це два синусоїдальні коливання однакової частоти.

[4] **Поляризація** – фізична характеристика оптичного випромінювання, яка описує поперечну анізотропію світлових хвиль, тобто їх нееквівалентність у різних напрямках площини, перпендикулярної ЕМХ.

1.3. Сутність дистанційного зондування

У розвитку ДЗЗ виділяють два взаємопов'язані напрямки – *природно-науковий* (дистанційні дослідження) та *інженерно-технічний* (дистанційні методи), що знайшло відображення в широко вживаних англомовних термінах *remote sensing* і *remote sensing techniques*.

Терміни "віддалений носій" або "дистанційне зондування" позначають аерой супутникову зйомки і запозичені з англійської мови: "віддалений" або "дистанційний" – remote, "зйомка з віддалених платформ" – remote sensing[5] (RS). Однак цей термін не є загальновизнаним у світі, що й призвело до неоднозначного тлумачення сутності дистанційного зондування в різних країнах. Наприклад, у Болгарії вживається термін "дистанційне зондування Землі"; в Німеччині – "Fernerkundung der Erde" (дистанційна розвідка Землі); в Польщі – "Interpretacja zdiięć lotnicyzch", "Teledetekcja" (дистанційне виявлення). В Україні найбільш поширеними є словосполучення "дистанційне зондування Землі" (ДЗЗ) і "аерокосмічні дослідження". Проте, як зазначають деякі дослідники, поняття "дистанційні дослідження Землі" або "дистанційне зондування Землі" є більш універсальним, оскільки не наголошує на розмежуванні між атмосферою і космічним простором, не фокусується визначенням конкретики в поняттях аеро- та супутникових досліджень, що різняться головним чином носіями знімальної апаратури [72].

Щодо розбіжностей у поняттях "дистанційне зондування" і "дистанційні дослідження" ("аерокосмічні методи дослідження"), то, на думку [72], це викликано тим, що перша назва акцентує увагу на технічних умовах аерокосмічних зйомок, параметрах космічних носіїв і знімальної апаратури, тоді як друге поняття зосереджує більшу увагу на дешифруванні та інтерпретації наземних об'єктів.

Перенесення інформації про об'єкти дослідження в просторі забезпечується речовино-енергетичними потоками. НПС, що оточує нас, пронизане потоками різних за своїми властивостями хвиль (механічних, гравітаційних, сейсмічних, звукових, вітрових та електромагнітних), що несуть інформацію про об'єкти, джерела і причини свого виникнення, про свою трансформацію на шляху від джерела до приймача. Потрібно лише мати можливість сприймати ці хвилі і вміти інтерпретувати їх (зчитувати з них інформацію).

Дистанційні методи є непрямими методами вимірів. За їх допомогою вимірюють не параметри, що безпосередньо цікавлять дослідника, а певні пов'язані (корельовані) з ними величини.

Інформація про віддалений об'єкт (місцевість) передається за допомогою ЕМВ, яке характеризується такими параметрами, як *інтенсивність*, *спектральний склад*, *поляризація* і *напрямок поширення*.

Дані можна отримувати одночасно в багатьох спектральних діапазонах і реєструвати на аеро- та супутникових знімках з різною просторовою розрізненністю.

[5] Термін "remote sensing" вперше застосували у Військово-морському відомстві США у 60-х рр. XX ст. [Cracknell, Hayes. 1991, p. 1].

При цьому утворюється безліч спектральних знімків об’єктів, причому просторова розрізненність певного знімка – зрізу задає дозволений рівень розгляду геометричних (просторових) деталей об’єктів на відповідному зображенні. ЕМВ різних спектральних діапазонів містить взаємодоповнювальну інформацію про об’єкти і явища на земній поверхні. Одночасна реєстрація випромінювання в декількох спектральних зонах (багатозональний принцип) дозволяє отримувати більше різних характеристик місцевості [85; 72]. Наприклад, є потреба оцінити стан сільськогосподарських посівів. Але апаратура супутника реєструє лише інтенсивність світлового потоку від цих об’єктів у певних ділянках оптичного діапазону. Щоб "розшифрувати" такі дані, потрібно виконати попередні дослідження, що включають в себе різні експерименти з вивчення стану рослин контактними методами; з вивчення відбивної здатності в різних ділянках спектра і при різних взаємних розташуваннях джерела світла (Сонця), листового покриву (вегетації) і вимірювального приладу. Далі слід визначити, як виглядають ті ж об’єкти з супутника, і лише після цього робити висновки про стан посівів за супутниковими даними.

Таким чином, під час ДЗЗ, зокрема за допомогою багатоспектральних космічних засобів, об’єкт відображується низкою іконічних моделей різної просторової розрізненності (детальності).

ДЗЗ – це процес одержання інформації про різні об’єкти та динамічні процеси і явища на поверхні Землі, в її надрах і атмосфері, шляхом реєстрації на прийомних чутливих елементах апаратури (сенсорах) відбитого або власного ЕМВ на відстані, з метою визначення місця розташування, виду, властивостей і часової зміни об’єктів навколишнього середовища без безпосереднього контакту з об’єктом.

Тобто *сутність ДЗЗ полягає в тому, щоб замість проведення вимірів за місцем розташування об’єкта спромогтися виміряти його характеристики на відстані.* Оскільки безпосередній контакт з об’єктом або неможливий, або недоцільний, залишається покладатися тільки на ту інформацію, яка міститься в зареєстрованому електромагнітному сигналі, наприклад, в оптичному, інфрачервоному або мікрохвильовому діапазоні.

Кінцевою метою ДЗЗ є розпізнавання об’єктів, явищ, процесів, що потрапляють у поле зору апаратури зондування, визначення їх положення в просторовій системі координат.

Дані ДЗЗ сьогодні – це аеро- та супутникові знімки, що подані в цифровій формі у вигляді растрових зображень, тому проблематика й інтерпретація даних ДЗЗ тісно пов’язана з цифровою обробкою зображень.

Аерокосмічний знімок – це двовимірне зображення реальних об’єктів, отримане за певними геометричними і радіометричними (фотометричними) законами шляхом дистанційної реєстрації яскравості об’єктів і призначене для дослідження видимих та прихованих об’єктів, явищ і процесів навколишнього світу, а також для визначення їх просторового місця розташування [13].

Кожен аеро- та супутниковий знімок є носієм двох видів інформації – *вимірювальної* і *семантичної*. Точність вимірювальної інформації є похідною від фотограмметричної якості знімка, обсяг семантичної інформації залежить від просторової та радіометричної розрізненності зображення, розміру кадру зображення тощо. Перераховані чинники є причиною того, що точність, повнота, достовірність аерокосмічної інформації про об'єкти зондування завжди є обмеженими. Безумовно, це ускладнює розв'язання тематичних завдань ДЗЗ [72].

Діапазон масштабів сучасних аеро- та супутникових знімків величезний: він може змінюватися від 1:1 000 до 1:100 000 000, тобто в 100 000 разів. При цьому найбільш розповсюджені масштаби аерофотознімків лежать у межах 1:10 000–1:50 000, а космічних – 1:200 000–1:10 000 000.

Усі аеро- та супутникові знімки прийнято поділяти на *аналогові* (фотографічні) і *цифрові* (електронні).

Цифрова́ фотографія – технологія фотографії, що використовує замість світлочутливих матеріалів, заснованих на галогеніді срібла, перетворення світла світлочутливою матрицею і отримання цифрового файлу, використовуваного для подальшої обробки і друку.

Зображення цифрових знімків утворене з окремих однакових елементів – *пікселів* (англ. *pixel* від *picture element або picture cell – елемент зображення*); яскравість кожного пікселя характеризується певним числом.

Аеро- та супутникові знімки як інформаційні моделі місцевості характеризуються низкою властивостей, серед яких виділяють *образотворчі, радіометричні (фотометричні)* і *геометричні*.

Образотворчі властивості характеризують здатність знімків відтворювати дрібні деталі, кольори і тонові градації об'єктів.

Радіометричні властивості свідчать про точність кількісної реєстрації знімком яскравостей об'єктів.

Геометричні властивості характеризують можливість визначення за знімками розмірів, довжин і площ об'єктів і їх взаємного положення.

Важливими показниками знімка слугують просторове охоплення і розрізнення. Як правило, для досліджень потрібні знімки великого охоплення і високого розрізнення. Однак задовольнити ці суперечливі вимоги в одному знімку не вдається. Зазвичай чим більше охоплення одержуваних знімків, тим нижче їх розрізнення. Тому доводиться йти на компромісні рішення або виконувати одночасну зйомку кількома системами з різними параметрами.

1.4. Особливості супутникових знімків

Відмінності і переваги космічної інформації від даних, отриманих з джерел наземного та повітряного базування, головним чином зумовлені особливостями орбітального польоту – висотою і швидкістю руху КА.

Особливості супутникових знімків подано на рис. 1.6.

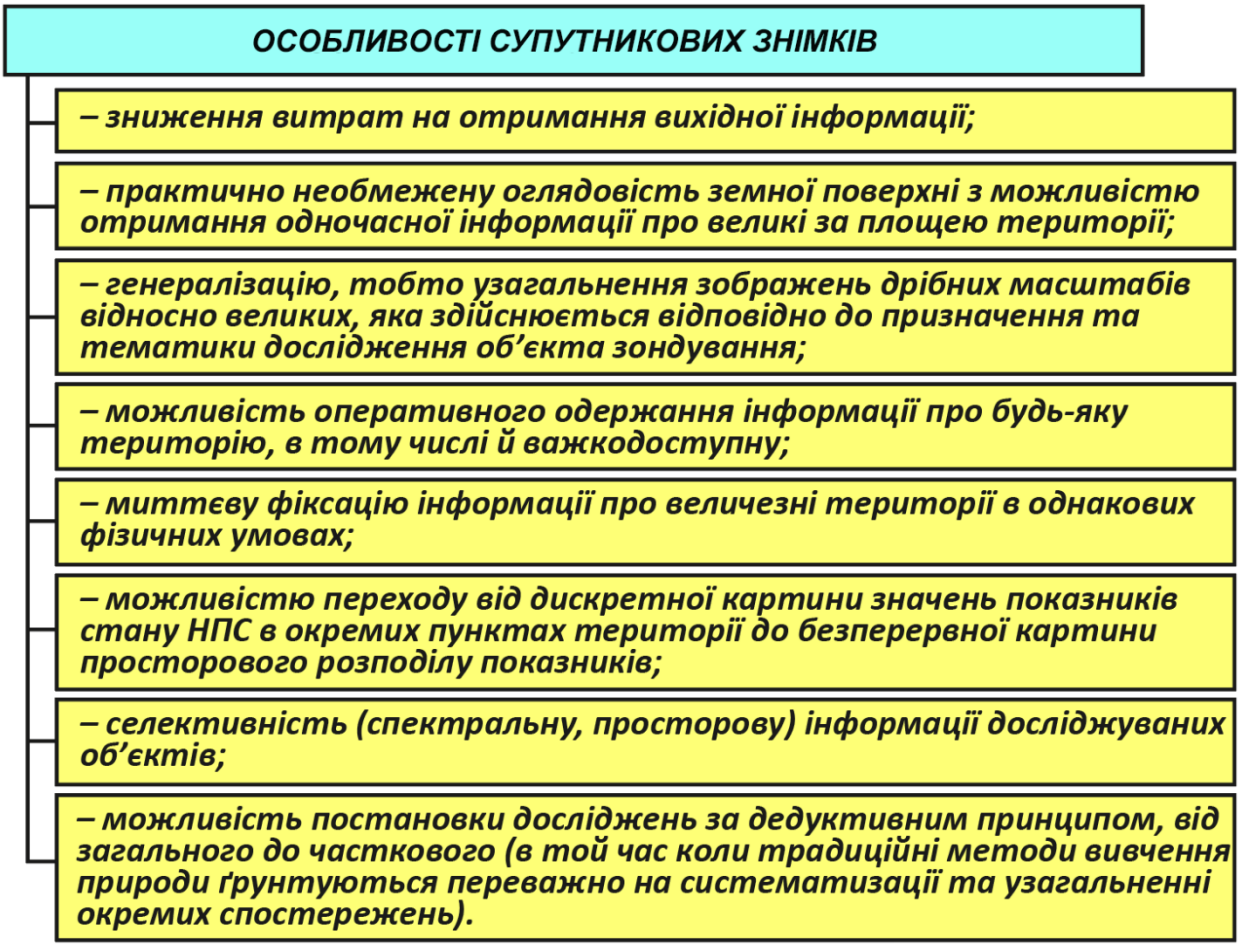


Рис. 1.6. *Особливості супутникових знімків*

Ці переваги найбільш відчутні в сфері глобального моніторингу, де оглядовість матеріалів і генералізація інформації відіграють вирішальну роль, а також у сфері національного моніторингу держав, що займають значні території. Однак і в сфері регіонального моніторингу при розв'язанні конкретних завдань дистанційні методи можуть успішно доповнювати контактні методи вимірів, а в деяких випадках навіть перевершувати їх за інформативністю [27].

Проте супутниковими знімками неможливо повністю замінити існуючі види аерофотознімків, які були і залишаються стандартними матеріалами для виготовлення топографічних карт різних масштабів. Тому бажано зберегти їх і в майбутньому для складання основ топо- і фотокарт крупного і середнього масштабів. Підставою для цього слугують низька вартість чорно-білих панхроматичних знімків і простота технології виготовлення. З іншого боку, аерофотознімки можна використовувати для побудови ортофотопланів, стереомоделей місцевості і відповідно вести їх фотограмметричну обробку, що не завжди і не для всякої місцевості можна зробити за знімками з космосу.

Аерофотознімки, головною властивістю яких є високе просторове розрізнення, і побудовані за ним стереомоделі місцевості дають невичерпний матеріал як для випуску топографічних карт, так і для підготовки фотогеологічної основи для картування літофаціального складу та структури гірських порід.

Зображення, отримані за допомогою встановлених на супутниках сканерів, не завжди дозволяють будувати такі стереомоделі, але ця проблема вирішується, наприклад, за радарними зображеннями [75].

Супутникові знімки в первинному вигляді використовуються рідко. В більшості випадків вони потребують обробки (дешифрування). З цією метою супутникові знімки спрямовуються фахівцям, робота яких пов'язана з відповідним використанням супутникової інформації. Так з'являються геологічні, гідрологічні, містобудівні та інші дешифрувальні схеми, для складання яких потрібно знати систему дешифрувальних ознак досліджуваних об'єктів.

Дешифрування в ДЗЗ – це розпізнавання на знімку певних об'єктів, встановлення їх кількісних і якісних ознак.

Для дешифрування знімків потрібно знати технічні і природні умови супутникової зйомки, його час і дату, а також здійснити геоприв'язку зображення. Виявлення і розпізнавання на знімках об'єктів місцевості, морфометричних і морфологічних характеристик, встановлення взаємозв'язку їх з іншими об'єктами є суттю дешифрування.

Дешифрування аеро- та супутникових – це процес, за допомогою якого розкривається зміст аеро- та супутникових знімків, тобто встановлюється відповідність між об'єктами досліджень та їх фотографічними зображеннями; виявляється якісна та кількісна характеристика об'єктів, їх взаємне положення та зв'язок [55].

На рис. 1.7 в узагальненому вигляді подано схему виконання аерокосмічних досліджень [72].

Рис. 1.7. *Узагальнена схема основних технологічних етапів аерокосмічних досліджень*

Вони включають основні технологічні етапи:

– одержання знімка об'єкта дослідження і його подальше опрацювання;

– дешифрування і фотограмметричну обробку та складання за знімками карт різних масштабів;

– наповнення й актуалізацію баз даних геоінформаційних систем;

– складання геостатистичних прогнозів, які є кінцевою метою досліджень.

Оскільки одержати необхідні характеристики досліджуваного об'єкта тільки за знімками без певних натурних визначень, без звернення до "земної правди" в більшості випадків не є можливим, то необхідним етапом ДЗЗ є їх еталонування.

Також важливим елементом досліджень за аеро- та супутниковими знімками є оцінка достовірності і точності одержаних результатів. Для цього доводиться залучати іншу (додаткову) інформацію та опрацьовувати її іншими методами, що вимагає додаткових витрат.

1.5. Платформи систем дистанційного зондування

У процесі аеро- та супутникової зйомки енергія ЕМВ, що несе інформацію про об'єкт, перетворюється на зображення. Ця операція відбувається за допомогою аерокосмічного знімального комплексу, складовими якого виступають: носій знімальної системи; системи забезпечення польоту; системи навігації та орієнтації; знімальна система. Всі ці компоненти беруть участь у процесі побудови зображень і так чи інакше впливають на їх властивості.

Знімальна апаратура систем ДЗЗ може розташовуватися на різних платформах.

Платформою може виступати космічний апарат (КА, супутник), літак, гелікоптер, мотодельтаплан, безпілотний літальний апарат (БПЛА), аеростат (дирижабль та повітряна куля) і навіть проста тринога або вишка. В останньому випадку ми маємо справу з наземною зйомкою об'єктів (наприклад, для архітектурних і реставраційних завдань) або зйомками з природних або штучних висотних об'єктів.

На одній платформі може розташовуватися декілька знімальних пристроїв, що називаються інструментами або сенсорами (датчиками), що притаманно космічним апаратам (КА).

Зрозуміло, що чим вище знаходиться платформа з сенсором від досліджуваного об'єкта, тим більше охоплення і меншу деталізацію будуть мати одержувані зображення (рис. 1.8).

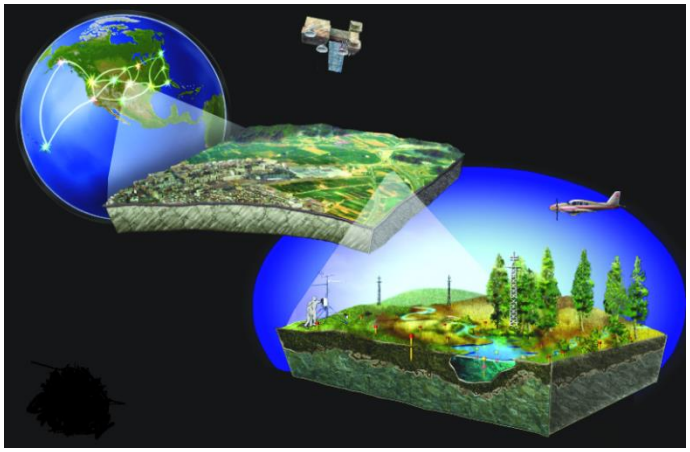


Рис. 1.8. *Залежність охоплення зйомки від висоти зйомки*

Процес зондування Землі з космосу здійснюється за допомогою системи, яка включає сукупність космічних (повітряних) та наземних технічно-інформаційних засобів, що функціонально та організаційно пов'язані між собою.

1.6. Складові компоненти системи ДЗЗ

Для функціонування системи дистанційного зондування потрібна узгоджена робота 4-х складових ланок, поданих на рис. 1.9.

Рис. 1.9. *Компоненти системи дистанційного зондування*

Бортовий комплекс ДЗЗ *(рис. 1.10)* ***– це складова частина системи ДЗЗ, що розташована на носієві і містить у собі технічні засоби дистанційного зондування (сенсори) та засоби передачі отриманих даних на Землю [13].***

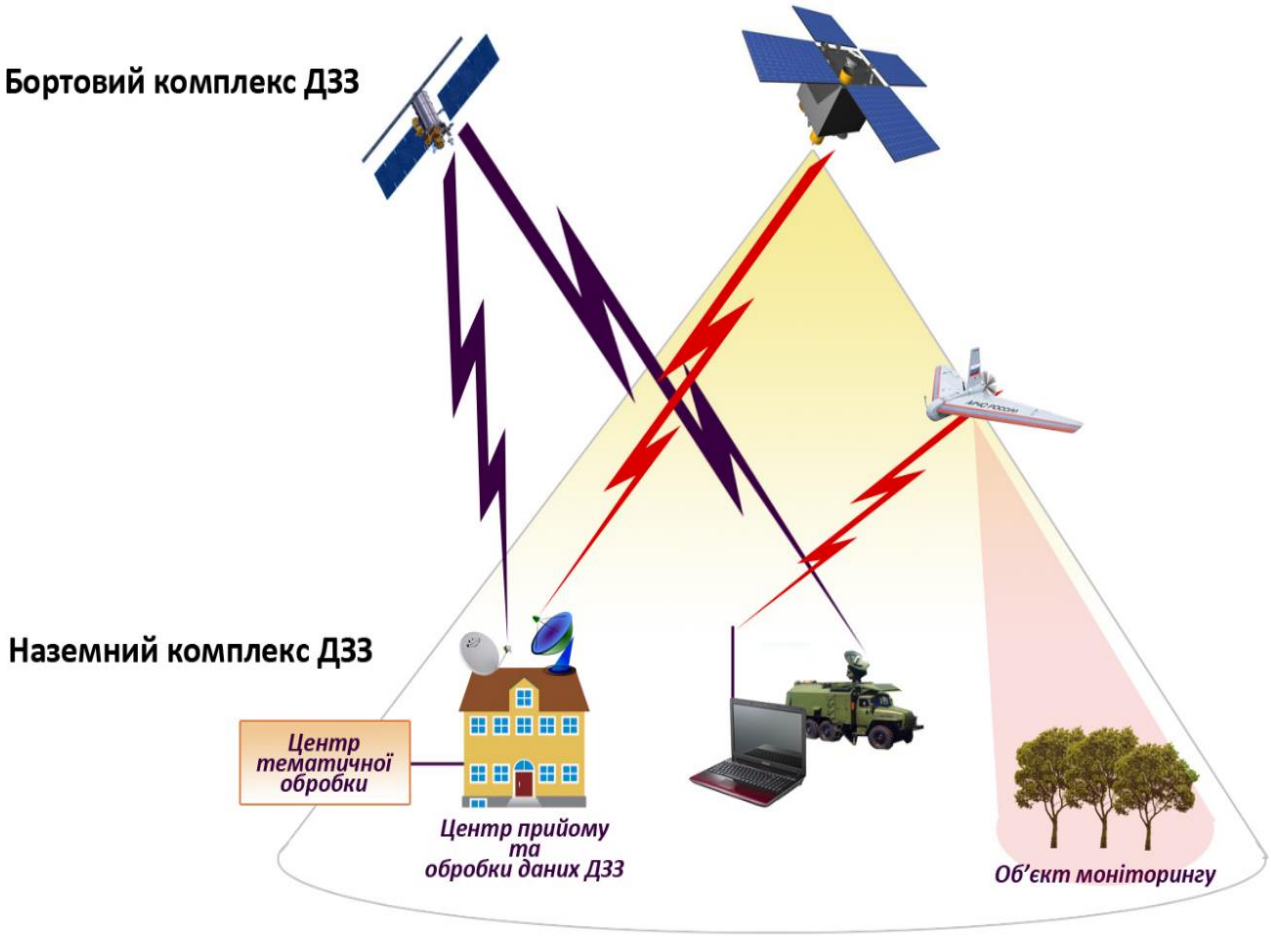


Рис. 1.10. *Бортовий і наземний комплекси ДЗЗ*

Наземний інформаційний комплекс *(рис. 1.10)* *–* ***це складова частина системи ДЗЗ, що містить у собі засоби приймання, обробляння, архівування та розповсюдження даних ДЗЗ [13].***

Одночасно продовжується експлуатація та розробка апаратури ДЗЗ, орієнтовної на одержання просторово-інтегральних або локальних кількісних характеристик ЕМВ, які не формують зображення. У цьому класі систем ДЗЗ можна виділити декілька підкласів: нескануючі радіометри, спектрорадіометри, лідри.

Мережа приймальних станцій створюється таким чином, щоб забезпечити оперативне одержання результатів зйомки якомога більшої території. Це дозволяє зменшити навантаження на бортові запам'ятовуючі пристрої.

Регіональні станції прийому зазвичай перебувають у підпорядкуванні національних або міжнародних космічних служб, а локальні можуть належати організаціям або приватним особам.

Обладнання регіональних станцій, крім прийому даних у режимі реального часу, забезпечує повне розвантаження даних із бортових запам'ятовуючих пристроїв, їх попередню обробку й архівацію.

1.7. Організація передачі даних з космосу на Землю

Оскільки провідне місце в ДЗЗ займає вивчення об'єктів[6] за знімками, то головне завдання полягає в цілеспрямованому отриманні цих знімків і наступній їх обробці. У тому разі, коли платформою системи ДЗЗ є літак, жодних проблем з доставки даних не виникає. Даними є фотографічні плівки або цифровий запис на певному носієві. Оскільки літак виконує свою місію з дистанційного зондування за відносно короткий період часу, то дані дуже швидко надходять у відповідні лабораторії. Аналогічні операції виконують з даними, отриманими системами, розташованими на супутниках з низькою орбітою і коротким часом польоту – на шатлах.

Проблеми виникають, коли системи працюють на супутниках, що знаходяться в космосі по декілька років. Тобто дані, отримані сенсорами, потрібно передати на Землю в певне місце, де вони будуть опрацьовані (дешифровані, інтерпретовані та проаналізовані).

Можливі три способи передачі даних зі супутника на Землю [112].

Перший спосіб – це пряма передача даних на наземну станцію, яка перебуває в зоні прямої видимості супутника. До станцій висуваються підвищені вимоги з надійності прийому радіосигналу. Найбільш успішний прийом даних можливий при розташуванні приймальної станції на лінії прямої видимості з супутником, і цю лінію ніщо не повинно затіняти (рис. 1.11).

Крім того, лінія прямої видимості між приймальною станцією і супутником повинна бути високо над горизонтом, щоб звести вплив атмосфери до мінімуму. Всі ці вимоги поєднуються поняттям "*маски*" для даної приймальної станції.

[6] Об'єктом може бути як ділянка земної поверхні, так і окремі просторові об'єкти, явища процеси, які слугують предметом дослідження при дистанційному зондуванні.

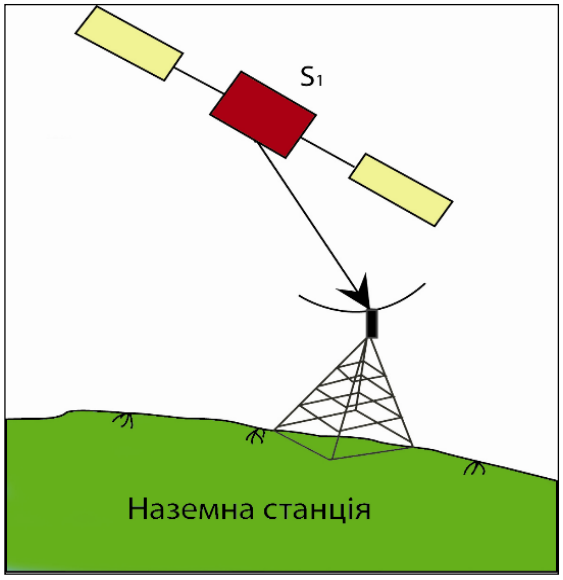


Рис. 1.11. *Схема безперервного радіозв'язку по лінії прямої видимості з супутником*

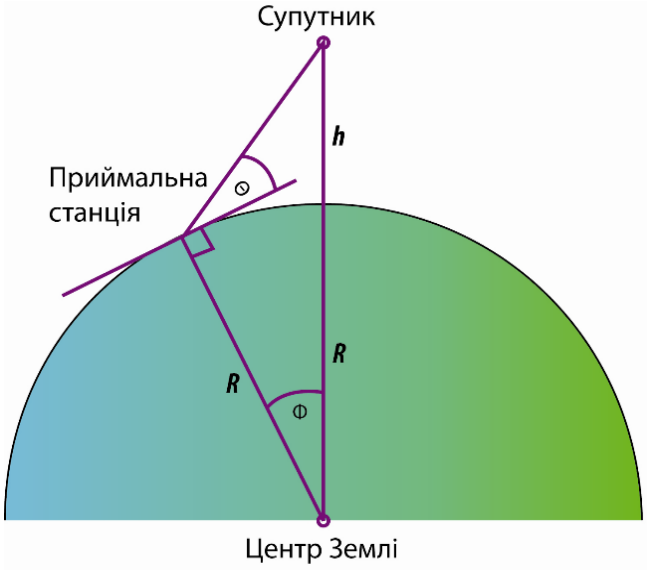


Рис. 1.12. *Схема розташування приймальної станції відносно супутника*

Маска – це ділянка поверхні Землі, усередині якої відбувається прийом даних із супутника [112].

Особливо жорсткі вимоги висуваються до маски при прийомі даних, орієнтованих по надиру з вузькою смугою.

Уявімо, що поверхня Землі – це сфера з радіусом R ($R \approx 6{,}37 \cdot 10^6$ м), висота орбіти супутника h і на лінії прямої видимості між супутником відсутні перешкоди (рис. 1.12).

Кутова відстань ϕ між приймальною станцією і супутником визначається з рівняння:

$$\cos(\theta + \phi) = \frac{R}{R+h}\cos\theta, \qquad (1.1)$$

де θ – кут підйому лінії прямої видимості.

Наприклад, якщо $\theta = 5°$, то з рівняння (1.1) отримаємо, що при h = *700 км* $\phi \approx 21°$. У цьому разі маска станції – це коло з радіусом 2400 км і приймальною станцією в центрі цього кола.

На рис. 1.13 зображено таку маску одиничної станції прийому даних з супутника.

Незважаючи на те, що на даний час у всьому світі дуже багато приймальних станцій, але всі вони розташовані на суші, а отже, неспроможні забезпечити зону прийому над океаном. Альтернативою побудові приймальних станцій з зоною прийому по всій поверхні Землі є спосіб збереження даних на борту супутника.

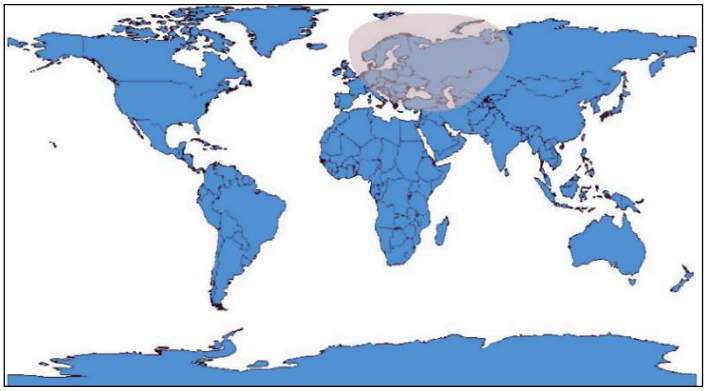


Рис. 1.13. *Типова маска станції для супутника з висотою орбіти 700 км*

Другий спосіб використовується у тому разі, коли перший спосіб неможливий. Отримані дані зберігаються на борту супутника, а потім передаються з певною затримкою в часі на приймальну станцію в зоні прямої видимості. Зазвичай дані збираються протягом 100 хв і передаються протягом 12 хв. Складнощі полягають у створенні на борту супутника пристроїв для збереження великих обсягів інформації і в тому, що збір інформації виконується не увесь час, тому такий метод організації передачі даних досить обмежений.

Третій спосіб передачі даних заснований на використанні системи геостаціонарних супутників зв'язку TDRSS (**T**racking and **D**ata **R**elay **S**atellite **S**ystem). У цьому разі дані передаються з одного супутника на інший до того часу, поки в зоні прямої видимості одного з них не з'явиться наземна станція (рис. 1.14).

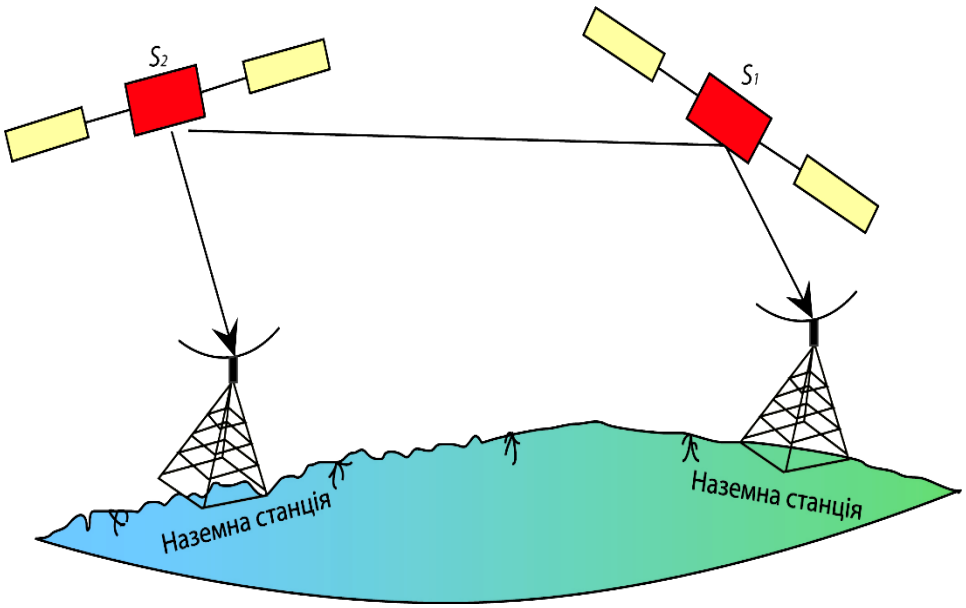


Рис. 1.14. *Передача даних супутникового зондування на Землю*

Після того як дані у вихідному форматі надійдуть на наземну станцію, виконується їх обробка, в результаті якої усуваються систематичні похибки і геометричні спотворення, а також спотворення, пов'язані з впливом атмосфери. Потім дані перетворюються до стандартного цифрового формату і записуються на магнітну стрічку або компакт-диск [112].

Зазвичай архіви даних формуються на наземних станціях, а бази даних ДЗЗ знаходяться у підпорядкуванні або державних організацій (наприклад, ДНВЦ "Природа" в Україні, NRSA в Індії), або комерційних компаній (наприклад, EOSAT в США).

Сьогодні провідні світові оператори працюють за іншими схемами: дані з сучасних КА скидаються на одну-дві станції оператора і надходять до споживача за допомогою високошвидкісних каналів зв'язку з використанням мережевих технологій. Зараз на персональні станції можна приймати, як правило, дані з морально (та й технічно) застарілих КА. Дані з сучасних КА ДЗЗ на персональні станції прийому не передаються, а оператори цих супутників не передбачають такої можливості і в майбутньому.

1.8. Тактико-технічні характеристики ефективності системи ДЗЗ

1. Для розв'язання широкого кола наукових і прикладних завдань дослідження Землі, атмосфери і навколоземного космічного простору за допомогою ДЗЗ, крім наявності на борту супутника спеціальних інформаційно-вимірювальних приладів і радіоліній для передачі даних, потрібно, щоб цільова інформація задовольняла широкий набір вимог, що висуваються до КА або космічної системи з декількох КА [116].

Доцільність і корисність використання методів і апаратури ДЗЗ подано на рис. 1.15.

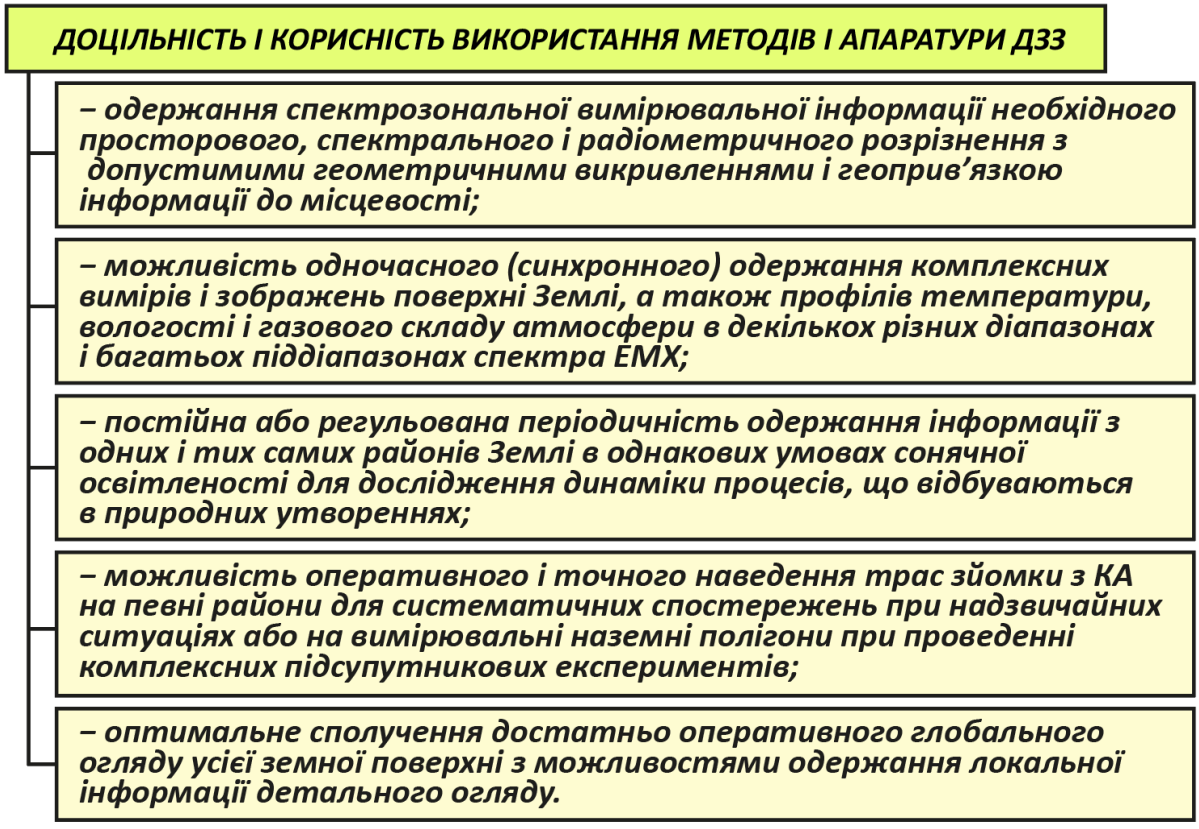


Рис. 1.15. *Доцільність і корисність використання методів і апаратури ДЗЗ*

Різні об’єкти ДЗЗ мають неоднакові спектрально-енергетичні відбивні та випромінювальні характеристики, відрізняються просторовими розмірами й геометричною формою, характером поводження в часі і просторі. Ці особливості об’єктів ДЗЗ слід враховувати при виборі космічної видової (іконічної) інформації для розв’язання завдань дослідження.

Основними характеристиками даних ДЗЗ, що отримуються з КА, є розрізненність, спектральні діапазони, кількість каналів, точність визначення координат, періодичність спостереження. За цими параметрами (критеріями) можна оцінювати придатність космічної системи до розв’язку тих або інших цільових завдань (рис. 1.16).

Просторова розрізненність (розмір пікселя) – це параметр, який пов’язаний з розміром пікселя – ділянкою на поверхні Землі, що покривається одним пікселем. Наприклад, якщо площа, що покривається одним пікселем розміром 1 на 1 метр, то просторове розрізнення буде 1 метр. Чим вище розрізнення зображення, тим менший розмір пікселя, тим вище детальність.

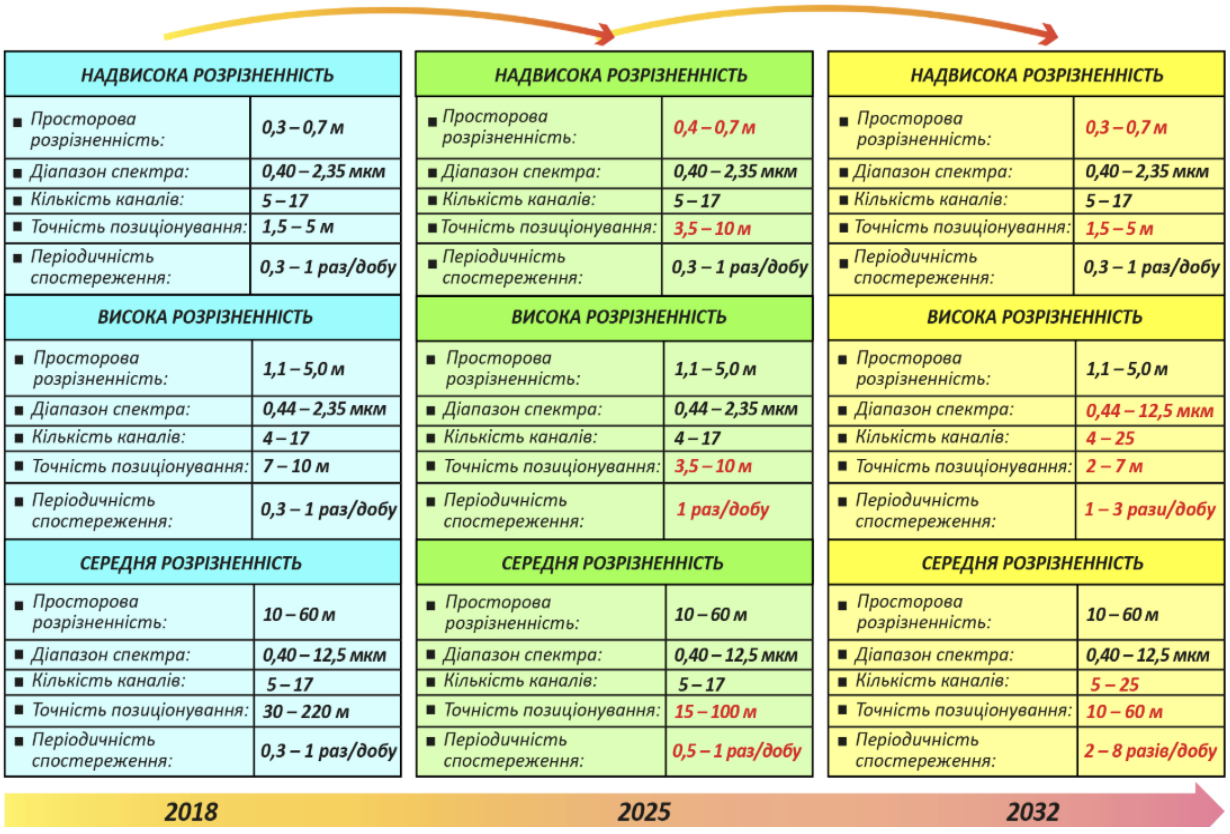


Рис. 1.16. *Вимоги до характеристик КА ДЗЗ [102]*

Просторове розрізнення аерокосмічного знімка – величина, яка характеризує розмір найменших об’єктів, що розрізняються на зображенні. Це розмір одного пікселя, тобто найменшої точки, яку спроможний розрізнити супутниковий сенсор.

Показник "*просторове розрізнення*" підходить для оцінки розміру на місцевості того мінімального об’єкта (або його окремої деталі), який зображений на знімку. Показник "*розрізненність*" найбільш підходить для оцінки можливості знімка роздільно передавати лінійні близько розташовані об’єкти.

Кожний з цих параметрів і сукупність їх реалізації в бортових комплексах КА визначають множину вимог до параметрів орієнтації і стабілізації, конструктивного компонування, масогабаритних і енергетичних характеристик, терморежимів, циклограм роботи й інших властивостей супутникової платформи і космічного апарата в цілому, балістики і динаміки його орбітального руху тощо.

Просторове розрізнення космічної інформації визначається миттєвим полем зору приладу реєстрації і при даній висоті орбіти характеризується розміром елементарної ділянки поверхні випромінювання ("пікселя"), спектрозональний потік радіації з якої сприймається бортовим сенсором як точковий (випромінювання точки певної яскравості), тому кажуть про горизонтальне розрізнення на поверхні Землі або просто виміряну в лінійних одиницях довжину на місцевості, найчастіше у метрах (рис. 1.17) [13].

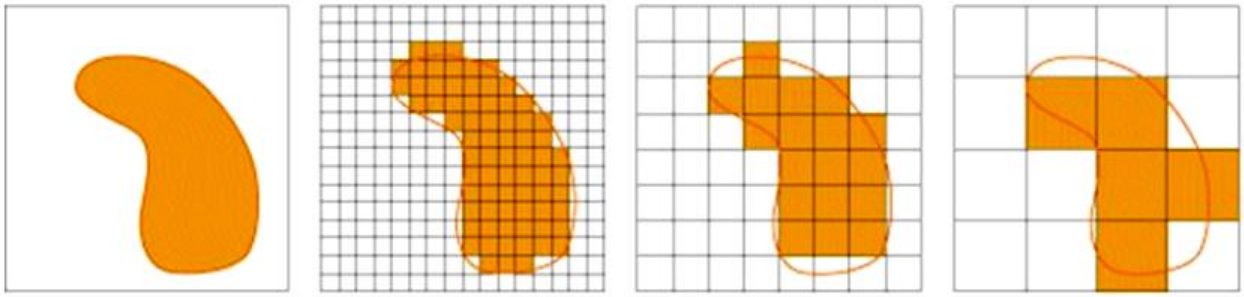


Рис. 1.17. *Ілюстрація просторового розрізнення – величина, яка характеризує розмір найменших об'єктів, що розрізняються на зображенні (розмір пікселя)*

Просторова розрізненність на місцевості *(spatial resolution)* ***– характеристика зображення, створювана видовим технічним засобом ДЗЗ, що визначає розмір найменшого компактного об'єкта або ширину видовженого об'єкта певного контрасту, яку можна визначити (розрізнити) на цьому зображенні з заданою імовірністю.***

Видові (іконічні) технічні засоби ДЗЗ за детальністю зображень, що ними формуються, зазвичай поділяють на системи надвисокої, високої, середньої, низької та наднизької просторової розрізненності (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Категорія просторової розрізненності	Умовне позначення	Детальність, м
Надвисока	Q	<0,5
Висока	H	0,5... 5,0
Середня	E	5,0... 50
Низька	F	50... 500
Наднизька	K	>500

Розподіл систем ДЗЗ за просторовою розрізненністю та детальністю. *Знімки низького просторового розрізнення* є оглядовими і дозволяють одномоментно охоплювати значні території – аж до цілої півкулі. Такі дані найчастіше

використовуються в метеорології, при моніторингу лісових пожеж й інших масштабних природних катаклізмів.

Знімки середнього просторового розрізнення – основне джерело даних для моніторингу природного середовища.

Знімки високого розрізнення з космосу донедавна здійснювались головним чином в інтересах військової розвідки, а з повітря – з метою топографічного картографування. Однак сьогодні вже є декілька комерційно доступних космічних сенсорів високого розрізнення (КВР-1000, IRS, IKONOS), які дозволяють виконувати просторовий аналіз з великою точністю або уточнювати результати аналізу при середньому або низькому розрізненні.

Величина розрізнення на місцевості (в $м^2$ або $км^2$) є найважливішим показником якості космічної інформації і задається в технічних вимогах на КА ДЗЗ. Цей параметр визначає геометричні характеристики зображення або поля виміру, тому його прийнято називати геометричним розрізненням на місцевості ΔR_λ для даної ділянки спектра.

Вимоги до просторового розрізнення й оперативності зйомки для космічних систем ДЗЗ за групами завдань подано на рис. 1.18. Одночасно багато корисної інформації можна добути, аналізуючи спектральний склад випромінювання, що реєструється відповідною апаратурою ДЗЗ (рис. 1.19) [79]

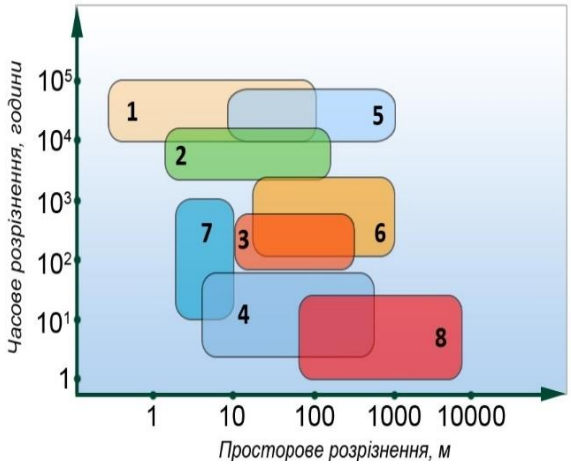


Рис. 1.18. *Вимоги до просторового розрізнення й оперативності зйомки для космічних систем ДЗЗ за групами завдань: 1 – картографування; 2 – оцінка стану лісів; 3 – сільське господарство; 4 – надзвичайні ситуації і катастрофи; 5 – геологія; 6 – океанологія; 7 – гідрологія (внутрішні басейни); 8 – метеорологія*

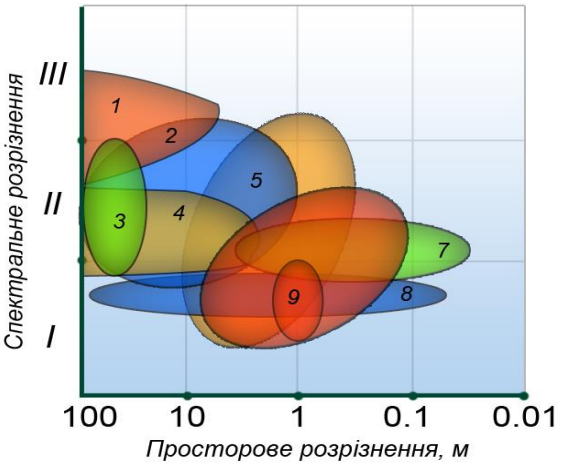


Рис. 1.19. *Групування завдань космічного ДЗЗ природно-техногенної сфери за спектральним розрізненням в оптичному діапазоні спектра: (I – панхроматична зйомка; II – багатоспектральна; III – гіперспектральна): 1 – гідрологія; 2 – сільське господарство; 3 – природні ресурси; 4 – екологічний моніторинг; 5 – лісові екосистеми; 6 – завдання розвідки; 7 – урбанізовані території і техногенні об'єкти; 8 – топографія; 9 – транспортні завдання*

Результати опрацювання вимог до параметрів космічної інформації, що висуваються в різних галузях науки, промисловості та сільського господарства [27], свідчать, що для розв'язання значної частини тематичних завдань ДЗЗ потрібні матеріали супутникової зйомки з просторовою розрізненністю до 5,0 м, а більшість (65%) завдань потребує використання видових даних зондування з розрізненністю краще 15 м.

Розрізненність матеріалів космічних зйомок помітно впливає на економічну ефективність їх використання.

При високій просторовій розрізненності не тільки розв'язуються більшість тематичних завдань, але й значна частина їх виявляється більш капіталоємною, ніж ті, що потребують матеріалів з меншою просторовою розрізненністю.

Спектральне розрізнення вказує на те, які ділянки спектру ЕМХ реєструються сенсором. При аналізі природного середовища, наприклад, для екологічного моніторингу, цей параметр – найважливіший.

Спектральна розрізненність *(spectral resolution)* ***– найменша різниця частот сигналів електромагнітного випромінювання, що надходить від об'єкта зондування, яку може визначити (розрізнити) технічний засіб ДЗЗ [13].***

Умовно весь спектр ЕМВ, що використовується в ДЗЗ, умовно поділяється на спектральні інтервали або зони (табл. 1.2), а в процесі ДЗЗ формують зональні знімки місцевості, кількість зон яких може становити декілька десятків, а то й навіть сотень.

Таблиця 1.2

Розподіл спектральних інтервалів у ДЗЗ

Спектральний інтервал	Позначення	Довжина хвилі, λ
Ультрафіолетовий (УФ)	U	<0,40 мкм
Видимий	V	0,40... 0,76 мкм
Ближній інфрачервоний (БІЧ)	N	0,76... 1,4 мкм
Середній інфрачервоний (СІЧ)	I	1,4... 7,5 мкм
Далекий (тепловий) інфрачервоний (ДІЧ)	T	7,5 мкм... 1,0 мм
Мікрохвильовий (МХ)	M	1,0... 10 мм
Радіочастотний (РЧ)	X	2,9... 3,3 см
	C	5,7... 6,1 см
	S	8,0... 12 см
	L	21... 30 см
	P	60... 70 см

Так створюють багатоспектральні і гіперспектральні зображення, що складаються з низки зональних зображень. Поділ спектра на спектральні інтервали

зумовлений відмінностями взаємодії ЕМХ і земної поверхні, відмінностями в процесах, що визначають відбиття і випромінювання ЕМХ.

Конкретний вибір спектральних діапазонів D_λ, в яких потрібно одержати космічну інформацію, визначається цільовим призначенням комплексу приладів даного типу КА. Як приклад, на рис. 1.20 подано знімки у різних спектральних діапазонах.

Весь використовуваний спектр ЕМВ, від ультрафіолету до мікрохвильового, зазвичай складається з декількох спектральних діапазонів, що несуть інформацію про різні властивості і стан поверхні Землі та її атмосфери. При цьому кожний з них може бути розбитий на окремі вузькі піддіапазони.

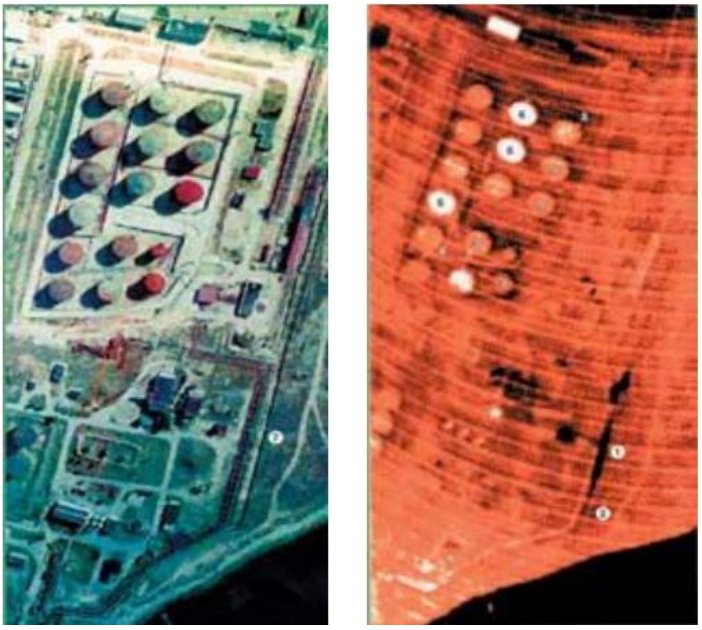


Рис. 1.20. *Приклад знімків у різних спектральних діапазонах: ліворуч – кольоровий аерознімок нафтобази, праворуч – нічний тепловий знімок цієї ж території. На тепловому знімку добре виділяються порожні (світлі кружечки) і наповнені ємності*

Комплексність інформації характеризується кількістю і шириною діапазону спектра D_λ, піддіапазонів $d_{\lambda i}$ в кожному діапазоні, а також сумарною кількістю діапазонів спектра ЕМХ, що використовуються для проведення одночасних вимірів даним КА:

$$n_\lambda = \sum_{i=1}^{D} d_{\lambda i} (i = 1, D).$$

Прагнення до комплексних синхронних вимірів визначається необхідністю одержання повноти і достовірності інформації, що вимагає урахування багатьох факторів, які впливають на випромінювання, відбиття й розсіювання енергії в системі "Земля – атмосфера", багатогранністю математичних алгоритмів обробки й інтерпретації космічної інформації.

Радіометрична розрізненність *(radiometric resolution)* ***– найменша різниця інтенсивностей сигналів, що надходять від об'єкта зондування, яку може визначити (розрізнити) технічний засіб ДЗЗ [13].***

Це кількість градацій значень кольору, що відповідають переходу від яскравості абсолютно "чорного" до абсолютно "білого". Виражається в кількості біт на піксель зображення. Зазвичай варіюється від 8 до 24 біт, що дає від 256 до 65536 рівнів (рис. 1.21).

Похідною від радіометричної розрізненності є *контраст зображення*. Зазвичай саме через величину контрасту визначають радіометричну якість аеро- та космічних зображень.

1 біт, 2 – градації

2 біти, 4 – градації

8 біт, 256 – градацій

24 біти, 65536 – градацій

Рис. 1.21. *Приклад радіометричної розрізненності*

Величину радіометричної розрізненності встановлюють за внутрішніми шумами фотоприймального блока видового технічного засобу, а також шумами випромінювання [101].

Часова розрізненність *(temporal resolution)* ***– найменший інтервал часу, через який можлива повторна зйомка сцени [13].***

На рис. 1.22 подано моніторинг запуску ракети.

Вимоги щодо оперативності надходження даних визначають параметри орбіти космічного апарату (КА), тип сенсора, склад наземних засобів обробки даних, організаційну схему доведення інформації до споживача тощо. Як свідчить досвід, близько половини тематичних завдань можуть бути розв'язані за даними ДЗЗ, що надходять до споживача у термін від 3 до 6 місяців, інші завдання потребують космічної інформації з терміном "свіжості" до 3-х місяців і менше.

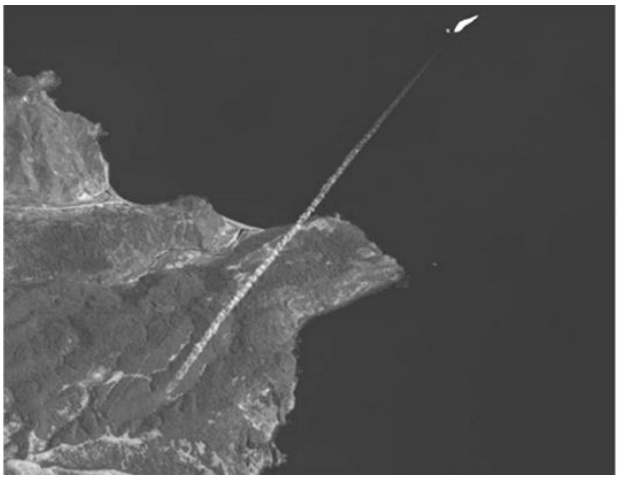


Рис. 1.22. *Приклад високої часової розрізненності – виявлення запуску ракети*

Вимоги до часу зйомки земної поверхні з космосу визначають тим інтервалом діб та/або сезоном (порою) року, коли контраст зображення, зумовлений сигналами від об'єктів, є найбільшим. У видимому діапазоні довжин хвиль зйомка виконується вдень, коли земна поверхня достатньо освітлена Сонцем. В ІЧ та мікрохвильовому діапазонах зйомка можна здійснюватися за відсутності сонячного освітлення, оскільки самі об'єкти зондування є джерелом випромінювання. Для довжин хвиль радіодіапазону атмосфера фактично прозора, радіочастотні засоби ДЗЗ є всепогодними, тому час зйомки і реєстрації радіолокаційного зображення особливого значення для успішної його інтерпретації не мав.

Вимоги до пори року, коли саме потрібно здійснювати зйомку і отримувати видову космічну інформацію, визначаються тематичним завданням і цільовим класом об'єктів ДЗЗ. Наприклад, для виконання тематичних завдань, пов'язаних з лісогосподарством, потрібні насамперед космічні зображення літнього періоду, для прогнозування врожаю – зображення, отримані наприкінці весни – влітку. Разом з тим деякі тематичні завдання (наприклад, оцінка зон надзвичайних ситуацій та збитків від них) потрібно виконувати у міру їх виникнення, незалежно від пори року [27].

Об'єкти, процеси, явища, що спостерігаються (вивчаються) із застосуванням космічних засобів зондування, мають свою динаміку виникнення, розвитку та існування в просторі і часі. Тому при постановці тематичного завдання задають координати (місце) та розміри району земної поверхні, яка підлягає спостереженню, і вказують бажаний час або інтервал часу спостереження.

Деякі тематичні завдання ДЗЗ, в першу чергу пов’язані з надзвичайними ситуаціями, метеорологією, висувають "жорсткі" вимоги щодо терміну надходження необхідної космічної інформації. Іноді для успішного виконання актуального завдання цей термін слід вимірювати годинами.

Необхідність спостереження сцени може бути одноразовою або може виникнути ситуація, коли визначена територія вимагатиме систематичного обстеження. Перша ситуація характерна, наприклад, для тематичних завдань картування, вимірювання біомаси, оцінювання запасів лісів тощо [27].

Систематичне обстеження визначеної території земної поверхні проводять, якщо вивчають, наприклад, сезонні зміни НПС, вплив на нього техногенних чинників, інші регулярні та нерегулярні процеси в природі. В подібних випадках періодичність оновлення космічної інформації обумовлюється часовим масштабом перебігу зазначених процесів і забезпечується моніторингом земної поверхні.

Періодичність спостереження земної поверхні в завданнях ДЗЗ в інтересах сільського господарства, землекористування становить тижні – місяці, в інтересах лісогосподарства – щоквартально – щорічно, дослідження прибережних зон та океанів, контролю водних ресурсів і забруднень – дні – тижні, у разі контролю глобальних атмосферних процесів – години – доби. Надзвичайні ситуації можуть обумовлювати потребу як спорадичного спостереження району лиха, так і його моніторингу на періодичній основі [27].

Смуга огляду. До параметрів, що характеризують космічну інформацію ДЗЗ, відноситься *смуга огляду на місцевості* (сцена), що вимірюється в кілометрах і визначає ширину території, яка обстежується сенсором постійної орієнтації при одному проходженні КА над даним районом. Смуга огляду на місцевості визначається повним полем зору й особливостями побудови сенсора, балістичними характеристиками КА (висота і стабільність орбіти) та обмежена припустимими геометричними викривленнями інформації через кривизну поверхні Землі.

Смуга огляду *(ground swath, image swath, swath width)* ***– смуга на поверхні Землі вздовж напрямку польоту космічного апарата, ширину якої визначає поле зору технічного засобу ДЗЗ, а довжину – тривалість зйомки, вимірювана в лінійних одиницях [13].***

Розміри сцени або площі земної поверхні визначають за ступенем локалізованості та просторовим розподілом об’єктів, явищ та процесів, що спостерігають і досліджують дистанційним методом. Тут можливі зовсім різні цифри: деякі об’єкти зондування можуть обіймати на Землі площу не більшу декількох квадратних кілометрів, інші розподілені на територіях у сотні і тисячі квадратних кілометрів. Часто в ДЗЗ просторовий масштаб зйомки класифікують на *глобальний, регіональний* та *локальний* (місцевий) рівні, інколи вводять проміжні – *континентальний* та *національний* рівні [22].

Не кожен сенсор, що стоїть на космічному апараті, має поле зору, яке дає змогу охопити сцену подібних розмірів, тому за потреби застосовують різні методи. Наприклад, найчастіше на космічній платформі розміщують кілька однакових

сенсорів так, щоб їхні головні оптичні осі були зсунуті по лінії впоперек напрямку польоту і таким чином забезпечували перекриття всієї сцени [22; 37]. Інший шлях – створення космічного угрупування з декількох супутників на суміжних орбітах. При цьому кожен супутник має свою ділянку (смугу) спостереження земної поверхні. В результаті можна одержати мозаїку космічних зображень на визначену територію земної поверхні.

Швидкість надходження інформації. Швидкість надходження (передачі) цифрової інформації вимірюється в біт/с і є узагальнювальним параметром космічної інформації, яка характеризується кількістю інформації, що передається або запам'ятовується за одиницю часу і визначається сукупністю показників інформаційних приладів: сумарною кількістю спектральних піддіапазонів, геометричним розрізненням, смугою обстеження, кількістю рівнів квантування сигналу, що забезпечує задану радіометричну точність.

Точність геоприв'язки. Важливим параметром якості інформації ДЗЗ, що надається споживачам, є точність геоприв'язки, тобто точність визначення координат сукупності елементів просторового розрізнення – кадру ("пікселів") на місцевості на Землі.

Геоприв'язка є складною функцією поточного або прогнозованого положення проєкції центра мас космічного апарата (КА) – так званої підсупутникової точки, кутового спрямовування геометричних осей КА відносно його центру мас (орієнтації КА) й урахування фактичної відмінності між напрямками оптичних осей сенсорів і датчиків орієнтації.

Зазвичай геоприв'язка здійснюється в процесі первинної обробки інформації, одержаної за допомогою дистанційних методів з урахуванням даних, отриманих від КА і низки інших чинників.

Значна кількість характеристик видової космічної інформації (просторова розрізненність, географічний район зйомки та його площа, періодичність оновлення космічної інформації) визначаються параметрами траєкторії руху КА, тобто його орбітою (рис. 1.23).

Параметри орбіти КА, що використовується для ДЗЗ, мають задовольняти низку специфічних вимог, найважливішими з яких є такі:

1) забезпечення сталої просторової розрізненності вздовж траси на місцевості й однакового масштабу зйомки;

2) досягнення максимальної оглядовості земної поверхні;

3) забезпечення спостереження земної поверхні вздовж траси польоту за приблизно однакових умов її освітлення Сонцем;

4) послідовний огляд усієї земної поверхні за якомога менший час.

Перша вимога задовольняється, якщо висота польоту КА над Землею є сталою: тобто, якщо зневажити відхиленнями форми геоїда від ідеальної сфери, то орбіта має бути круговою. Такі орбіти і є найпоширенішими для супутників ДЗЗ. Разом з тим зазначимо, що для постійного спостереження за глобальними процесами на Землі використовують еліптичні орбіти з великою різницею висот в апогеї та перигеї [70; 37].

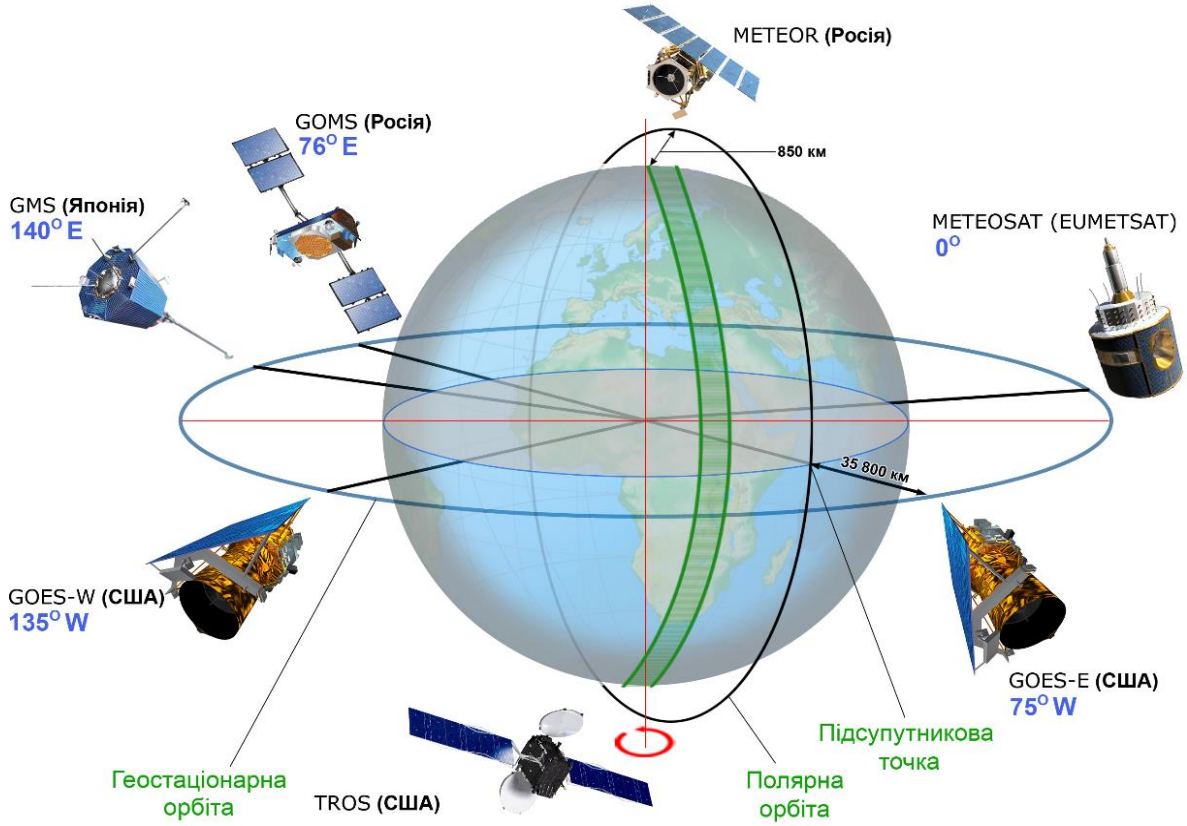


Рис. 1.23. *Приклади орбіт космічних апаратів*

Ступінь можливого огляду земної поверхні, або діапазон географічних широт зйомки, залежить від нахилу орбіти КА, тобто кута між площиною екватора і площиною орбіти. Залежно від величини нахилу розрізняють екваторіальні ($i = 0°$), полярні ($i = 90°$) (рис. 1.23) та нахилені орбіти (i – будь-яке, крім $0°$ та $90°$).

Максимальна оглядовість земної поверхні, включаючи полярні зони, досягається, якщо орбіта є полярною (квазіполярною). Зазначимо, що вже при кутах нахилу орбіт $50..\ 60°$ приполярні ділянки не простежуються.

Питання для самоконтролю

1. *Які діапазони ЕМВ використовуються в ДЗЗ?*
2. *В чому полягає фізична сутність аерокосмічних методів дослідження Землі?*
3. *Обґрунтуйте необхідність застосування ДЗЗ.*
4. *Наведіть класифікацію дистанційних методів зондування Землі.*
5. *Наведіть класифікацію видів аеро- та супутникової зйомки.*
6. *Охарактеризуйте платформи систем ДЗЗ.*
7. *Назвіть складові компоненти системи ДЗЗ.*
8. *Як здійснюється передача даних з космосу на Землю?*
9. *Назвіть вимоги до супутникової зйомки.*

ІІ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ДИСТАНЦІЙНОМУ ЗОНДУВАННІ ЗЕМЛІ

Дистанційне зондування Землі та інших космічних об'єктів можливе тільки тому, що існує такий носій інформації, як хвилі – механічні, акустичні, електромагнітні, що 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.

2.1. Джерела електромагнітного випромінювання

Відомо, що всі природні та штучні об'єкти випромінюють ЕМХ, які можуть бути *власними* або *відбитими*, причому ці хвилі, маючи однаковий характер, відрізняються частотою, довжиною хвилі, енергією і *є індивідуальними для кожного природного об'єкта* та займають певне місце в електромагнітному спектрі. Саме через це й стверджують, що *фізичною основою дистанційного зондування є відбите або власне випромінювання ЕМХ природними об'єктами*.

Електромагнітною хвилею називають процес поширення змінного електромагнітного поля в просторі і часі.

ЕМХ виникають у процесі змін електричного і магнітного полів. Кожна зміна електричного поля в будь-якій точці простору спричиняє в суміжних точках появу змінного магнітного поля, зміна якого породжує змінне електричне поле. Оскільки електромагнітне випромінювання (ЕМВ) є не що інше, як хвилі, то йому притаманні усі властивості коливальних процесів, тобто коливання електричного і магнітного полів у просторі спричиняє поширення ЕМХ.

Серед множини коливальних процесів особливе місце посідають періодичні гармонічні коливання, тобто коливання з рівномірним рухом.

Електромагнітне випромінювання – взаємопов'язані коливання електричного і магнітного полів, що утворюють електромагнітне поле.

ЕМХ можуть розповсюджуватися скрізь, де може існувати електромагнітне поле, у тому числі і в вакуумі.

Простір, що оточує людину, заповнений різними електромагнітними полями, джерела яких, залежно від їх походження, поділяють на *природні* та *штучні*.

До *природних джерел* належать: електромагнітне поле Землі (рис. 2.1), що включає геопатогенні зони[7]; космічні джерела радіохвиль (сонячні спалахи, магнітні бурі, випромінювання зірок тощо); процеси, що відбуваються в атмосфері Землі (блискавки, зміни в іоносфері).

[7] Локальні геохімічні аномалії токсичних або радіоактивних елементів у гірських породах, ґрунтах чи підземних водах на певній території.

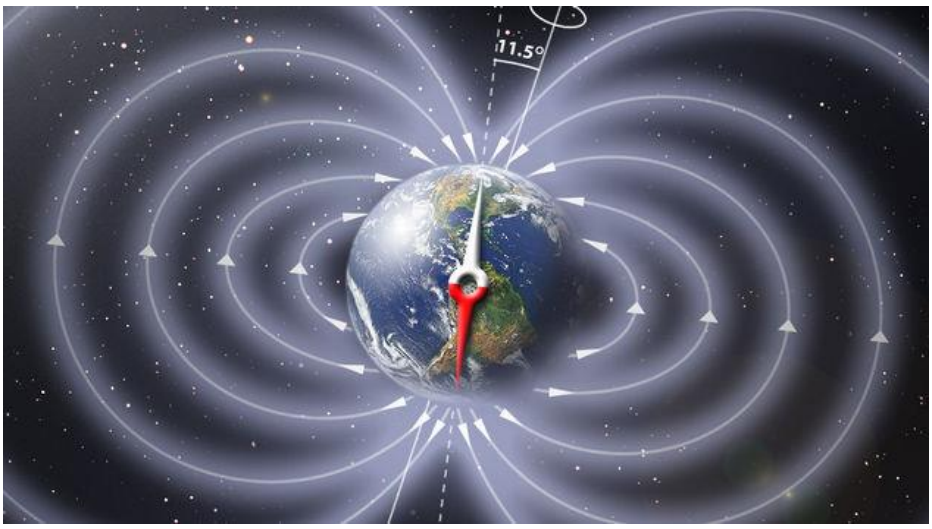


Рис. 2.1. *Електромагнітне поле Землі*

До *штучних джерел* належать пристрої, що спеціально створені для випромінювання електромагнітної енергії (радіо і телевізійні станції, радіолокаційні установки, системи радіозв'язку, фізіотерапевтичні прилади тощо), а також пристрої, які безпосередньо не призначені для випромінювання електромагнітної енергії в простір (лінії електропередач і трансформаторні підстанції, побутова і промислова техніка, оргтехніка тощо), однак які випромінюють її.

ДЗЗ ґрунтується на використанні властивостей ЕМВ від різних джерел. Існує три основні джерела ЕМХ:

– електромагнітне випромінювання Сонця;

– власне випромінювання поверхні Землі;

– штучне випромінювання.

Сонце випромінює ЕМХ широкого діапазону від 10^{-10} мкм (космічні промені) до 10^{10} мкм (радіохвилі). Інші природні джерела світла, що надходить до поверхні Землі, порівняно з Сонцем є слабкими (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Природні джерела електромагнітного випромінювання [72]

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

Другою сукупністю джерел випромінювання ЕМХ на Землі є власне випромінювання земної поверхні, тобто тих субстанцій, які становлять її радіаційно-активний шар (РАШ). Власне випромінювання Землі пов'язане з внутрішньоземним тепловим потоком, геохімічними і біохімічними процесами і складається із гамма-променів і теплового випромінювання.

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

Джерелами випромінювання ЕМХ 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.

ЕМХ виникають у процесі змін електричного і магнітного полів. Кожна зміна електричного поля в будь-якій точці простору викликає в суміжних точках появу змінного магнітного струму, зміна якого, в свою чергу, породжує зміну електричного поля. Як наслідок, відбувається розповсюдження ЕМХ.

Випромінені Сонцем ЕМХ поширюються в усіх напрямках, частково доходять до Землі, зазнаючи при цьому трансформацій в атмосфері (розсіювання випромінювання в атмосфері).

Решта випромінювання доходить до поверхні Землі, де частина відбивається наземними поверхнями, а частина поглинається поверхнею і об'єктами на ній, активуючи їх і формуючи величезну розмаїтість нових випромінюючих об'єктів (рис. 2.2).

Рис. 2.2. *Взаємодія ЕМВ з атмосферою*

Усі природні та штучні земні об'єкти різним чином *випромінюють*, відбивають або *поглинають* ЕМХ певного спектрального складу й інтенсивності. Випромінювання кожного природного або штучного об'єктів відповідає індивідуальним властивостям об'єктів, модифікується їх станами, що змінюються в часі, а отже, несе інформацію безпосередньо про самі об'єкти та про їх стани, тобто вони пов'язані з природою і кількістю речовини, а це обумовлює можливість розрізнення, зчитування та інтерпретацію цієї інформації.

Спосіб відбиття і/або поглинання і випромінювання об'єктом енергії – це сигнал, який потрібно зареєструвати і перетворити на кількісну форму подання.

Відбите випромінювання характеризує відбивну здатність об'єкта, подається значеннями спектральної щільності енергетичної яскравості і вимірюється за допомогою дистанційного пристрою – сенсора (датчика).

Отримані величини енергетичної яскравості перетворюються на дискретні цифрові значення, які називаються *коефіцієнтами інтегральної* або *спектральної яскравості* і відповідають характеристикам відбивної здатності досліджуваних об'єктів.

Оскільки більшу частину ЕМВ органи чуття людини не сприймають і не можуть бути опрацьовані її мозком безпосередньо, а отже, не можуть бути інтерпретовані людиною, виходячи з природних відчуттів, то людство використовує лише частину діапазону ЕМХ.

Для розширення діапазону сприйняття ЕМХ і отримання корисної інформації про навколишній світ людство створило велику кількість пристроїв, які поступово трансформувались до сучасних можливостей дослідження космосу з Землі і дослідження Землі з космосу. Усі ці пристрої ґрунтуються на аналізі специфічних особливостей об'єктів відбивати, поглинати і випромінювати ЕМХ у різних спектральних діапазонах.

2.2. Характеристики електромагнітного випромінювання

З курсу фізики відомо, що ЕМВ – це *електромагнітні хвилі (ЕМХ)*, що збуджуються різними об'єктами випромінювання – зарядженими частинками, атомами, молекулами, а також різними генеруючими пристроями.

ЕМХ створюються за рахунок електричних і магнітних вібрацій, що виникають в атомах, тобто електричними зарядами, що рухаються з прискоренням і які мають широкий діапазон частот. Прикладами ЕМВ можуть слугувати світло, радіохвилі, інфрачервоні і ультрафіолетові, а також рентгенівські і гамма-промені.

Тобто ЕМВ – це *вид енергії*, який існує у формі видимого (світлового), інфрачервоного (теплового) та ультрафіолетового випромінювання, мікро- і радіовипромінювання, гамма- та рентгенівських променів.

Енергія – це здатність виконувати роботу. Існують різні форми енергії – *хімічна, електрична, теплова і механічна*.

При виконанні роботи енергія передається від одного тіла до іншого або з одного місця в інше. Така передача здійснюється за рахунок *провідності*,

конвекції або *випромінювання*. Саме з останнім переносом енергії і мають справу при дистанційних методах дослідження.

Як і більшість інших наукових дисциплін, теорія дистанційних методів дослідження описує складні явища, ситуації і взаємодії за допомогою *моделей*. Для опису і пояснення найбільш важливих особливостей ЕМВ використовуються дві моделі (корпускулярно-хвильовий дуалізм). Одні властивості ЕМВ зручніше описувати, виходячи з його хвильової природи, інші – з корпускулярної (квантової). Гіпотезу про подвійну природу світла уперше висунув А. Ейнштейн.

Доказом хвильової природи ЕМВ слугує явище інтерференції; наприклад, загальновідомі райдужні інтерференційні картини на тонкій плівці мильної бульбашки (рис. 2.3) або розлитої по поверхні води оливи чи бензину (рис. 2.4).

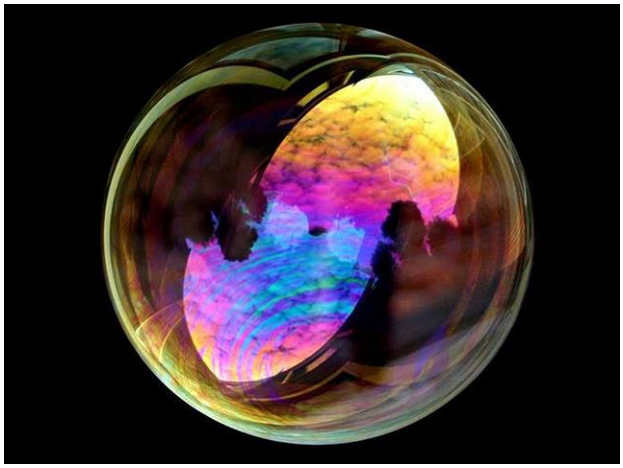


Рис. 2.3. *Райдужна інтерференційна картина на тонкій плівці мильної бульбашки*

Рис. 2.4. *Інтерференційна картина розлитого по поверхні води бензину*

Корпускулярна природа світла проявляється у фотоелектронній емісії; наприклад, при потраплянні світла на фотоелемент у ньому виникає електричний імпульс, пропорційний кількості квантів світла або фотонів, що потрапили на нього.

Таким чином, ЕМВ може описуватись або моделлю плоскої гармонійної хвилі, яка складається з електричного ($\vec{E}$) і магнітного ($\vec{B}$) полів, розташованих ортогонально одне до одного і до напрямку поширення енергії $\vec{v}$, або у вигляді потоку фотонів – частинок, кожна з яких несе певну кількість енергії. Ця подвійність і є причиною того, чому це випромінювання називають *електромагнітним*.

Електромагнітне випромінювання – розповсюдження енергії в просторі у вигляді хвиль або прямолінійного потоку світлових частинок – фотонів.

ЕМВ характеризується чотирма параметрами: частота (або довжина хвилі), напрямок розповсюдження, амплітуда і площина поляризації, які надають різну інформацію про об’єкт (рис. 2.5).

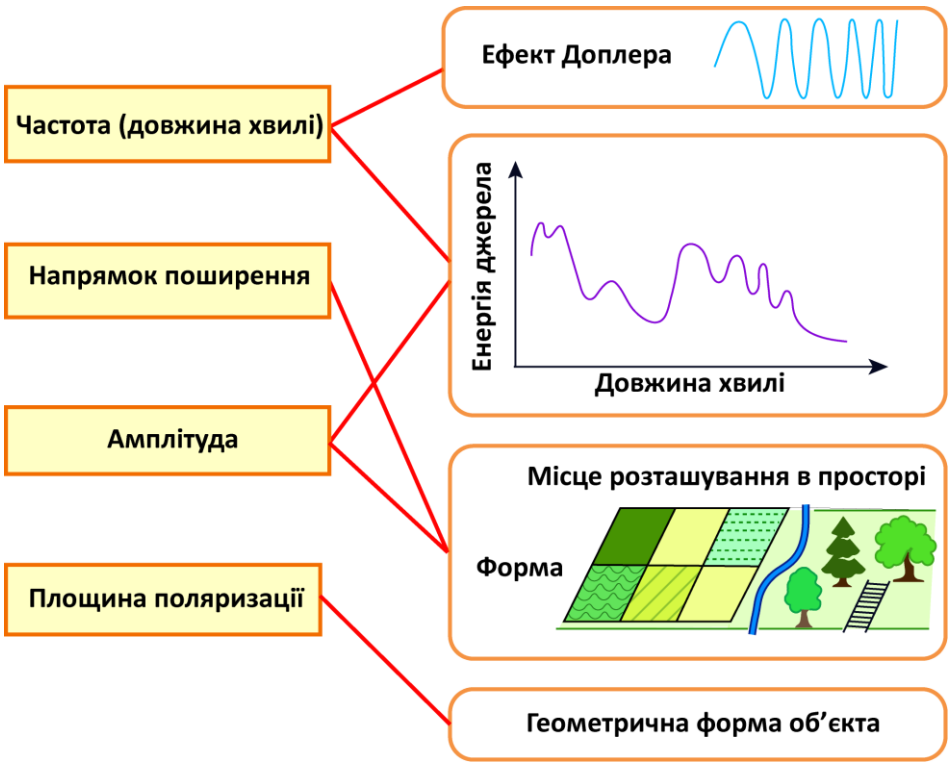


Рис. 2.5. *Характеристика інформації, що міститься в параметрах електромагнітного випромінювання*

Частота (або довжина хвилі) характеризує колір об'єкта у видимому діапазоні спектра, який визначається унікальною кривою, що пов'язує довжину хвилі та енергію випромінювання. У мікрохвильовому діапазоні інформацію про об'єкти отримують, використовуючи ефект зміни частоти, який виникає при відносному переміщенні об'єкта спостереження і платформи (ефект Доплера). Просторове місце розташування і форма об'єктів визначаються завдяки лінійності напрямку розповсюдження ЕМХ, а також за її амплітудою. На площину поляризації у мікрохвильовому діапазоні впливає форма обводів об'єктів при відбитті або розсіюванні. У разі локації горизонтальна і вертикальна поляризації дають різні відгуки на індикаторі радіолокатора.

Згідно з хвильовою теорією ЕМВ є електромагнітною хвилею, рівняння якої має вигляд:

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos\left[2\pi\left(\nu \cdot t - r/\lambda\right) + \varphi\right], \qquad (2.1)$$

де $\vec{E}$ – вектор напруженості електричного поля;
$\vec{E}_m$ – векторна амплітуда напруженості;
ν – частота випромінювання;
t – час випромінювання;
r – відстань, що пройшла хвиля;
λ – довжина хвилі;
φ – початкова фаза;
$\left[2\pi\left(\nu \cdot t - r/\lambda\right) + \varphi\right]$ – фаза ЕМХ.

З формули (2.1) випливає, що ЕМХ являє собою коливальний процес, який відбувається одночасно в часі і просторі, оскільки аргумент косинуса (фаза ЕМХ) залежить від часу розповсюдження і пройденої хвилею відстані. Також можна зробити висновок, що ЕМВ повністю визначається характеристиками: довжина хвилі λ (частотою ν), амплітудою хвилі $\vec{E}_m$, фазою хвилі і орієнтацією вектора $\vec{E}$. Інформація, що переноситься ЕМХ, міститься в характеристиках хвилі, які можуть бути виміряні й опрацьовані.

Коливання відбуваються в напрямках, перпендикулярних напрямку поширення (рис. 2.6).

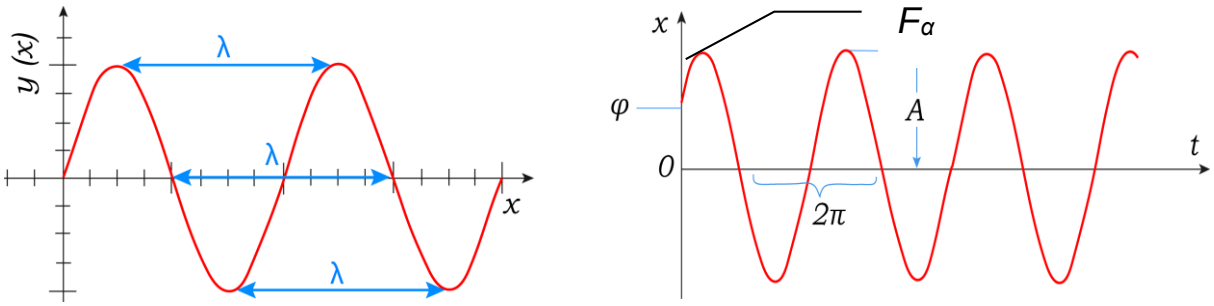


Рис. 2.6. *Графічна ілюстрація характеристик електромагнітної хвилі*

Хвильова модель ототожнює випромінювання з регулярними коливальними змінами в електричних і магнітних полях, що оточують заряджену частинку. Оскільки ЕМВ є не що інше як хвилі, йому притаманні всі властивості коливальних процесів.

Характеристиками ЕМВ з хвильової точки зору (як класичної синусоїдальної хвилі) є *довжина хвилі* (λ), *частота електромагнітних коливань* (ν) і *хвильове число*.

Довжина хвилі *(λ)* ***– відстань, на яку хвиля розповсюджується за один цикл (відстань між двома сусідніми максимумами).***

Зазвичай порівняно короткі хвилі (менше сантиметра) характеризують довжиною хвилі, а більш довгі – частотою. Зв'язок між довжиною хвилі і частотою визначається формулою:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \qquad (2.2)$$

де ν – частота коливань електромагнітного поля;
c – швидкість поширення ЕМХ.

Фактично довжина хвилі є відстань, яку проходить хвиля за проміжок часу, що дорівнює одному коливанню.

Довжина хвилі і її частота пов'язані між собою обернено пропорційною залежністю. Наприклад, хвиля з частотою $\nu = 10^{14}$ Гц має довжину $\lambda = 3 \cdot 10^{-6}$ *м* або 3 мкм , а у хвилі з частотою $\nu = 10^{9}$ Гц = 1 ГГц довжина λ = 0,3 м = 30 см.

Оскільки ЕМХ розповсюджуються практично з однією швидкістю, майже зі швидкістю світла, то довгохвильове випромінювання має низьку частоту, а короткохвильове характеризується більш високими частотами.

Довжини ЕМХ охоплюють діапазон від кількох ангстрем до кількох метрів. Довгі хвилі зазвичай вимірюються в метрах, сантиметрах, міліметрах, а короткі – в мікрометрах (мікронах), нанометрах (мілімікронах), ангстремах:

- ангстрем ($\overset{\circ}{A}$) =10^{-10} м = 10^{-8} см = 10^{-4} мкм;
- нанометр (нм) =10^{-9} м = 10 $\overset{\circ}{A}$ = 10^{-3} мкм;
- мікрометр (мкм) =10^{-6} м = 10^{4} $\overset{\circ}{A}$.

Сукупність усіх довжин ЕМХ називають *електромагнітним спектром*.

Величина k, обернена до довжини хвилі, називається *хвильовим числом*, яке зазвичай вимірюється в обернених сантиметрах. У системі СІ одиниця вимірювання хвильового числа – $м^{-1}$, але вона використовується рідко.

Хвильове число – параметр хвилі, який визначає кількість довжин хвилі, що поміщаються в 2π одиниць довжини:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

В оптиці і спектроскопії хвильовим числом часто називають величину, обернену довжині хвилі. Згідно з означенням хвильове число зв'язане із довжиною хвилі λ співвідношенням:

$$k = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}, \qquad (2.3)$$

де c – швидкість розповсюдження ЕМВ.

Хвильове число показує кількість довжин хвиль, які вміщуються на довжині 1 см, має розмірність $см^{-1}$ і називається герц (Гц). Використовуються кратні величини: мегагерц (1 МГц = 10^6 Гц), гігагерц (1 ГГц = 10^{12} Гц).

Частота коливань – це фізична величина, яка чисельно дорівнює кількості повних коливань, які здійснює тіло за одиницю часу.

Розрізняють *лінійну* частоту ν й *циклічну* частоту $\omega = 2\pi\nu$.

Лінійна частота – це кількість періодичних процесів за секунду. Лінійна частота здебільшого позначається грецькою літерою ν:

$$\nu = \frac{1}{T},$$

де T – період, *с.*

Циклічна, або ***кутова, частота*** – це кількість коливань за 2π секунд. Циклічна частота здебільшого позначається грецькою літерою ω.

Кутова (циклічна) частота (ω) – кількість циклів хвильових коливань у фіксованій точці простору за певний інтервал часу (рис. 2.7):

$$\omega = 2\pi\nu.$$

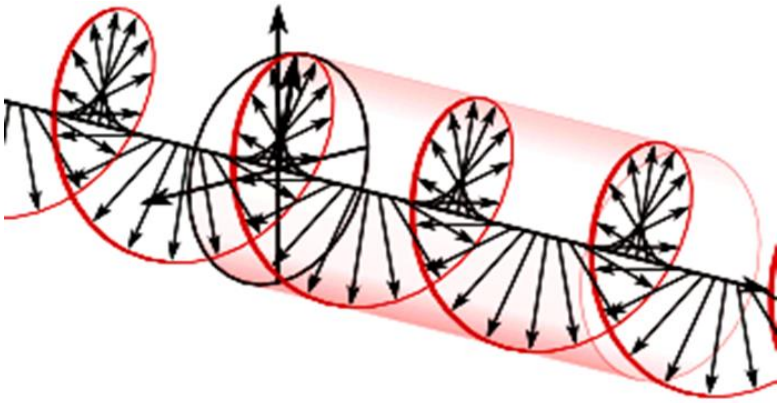


Рис. 2.7. *Графічна ілюстрація кутової частоти ЕМХ*

Орієнтація вектора $\vec{E}$ визначає поляризацію ЕМХ. Крім вектора $\vec{E}$, ЕМХ також обов'язково володіє вектором напруженості магнітного поля $\vec{H}$. Вектори $\vec{E}$ та $\vec{H}$ перпендикулярні один одному і напрямку поширення.

Знаючи величину E, завжди можна знайти значення H за формулою:

$$H = E/120\pi .$$

На рис. 2.8 показано миттєвий "знімок" вертикально поляризованої (вектор $\vec{E}$ коливається у вертикальній площині, вектор $\vec{H}$ – у горизонтальній площині) ЕМХ, що поширюється у напрямку осі *x*.

Цей вектор називається вектором *Умова-Пойнтинга* і характеризує енергію, що переноситься хвилею. Він пов'язаний з напруженням електричного і магнітного полів співвідношенням (рис. 2.9):

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H} .$$

Оскільки системи ДЗЗ реєструють тільки напруженість електричного поля або яскравість, пропорційну квадрату напруженості, то під електромагнітним полем далі будемо розуміти вектор $\vec{E}$.

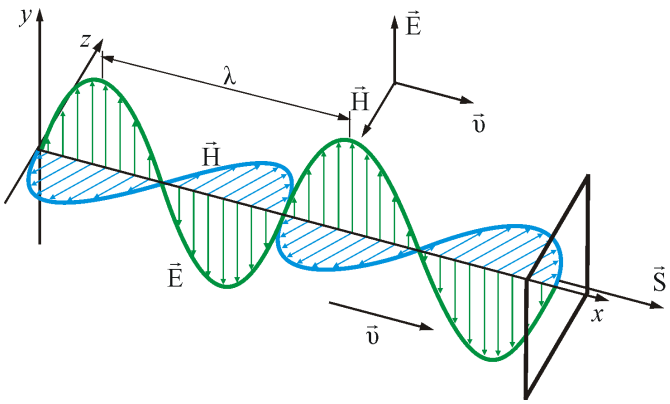


Рис. 2.8. *Поляризація ЕМХ*

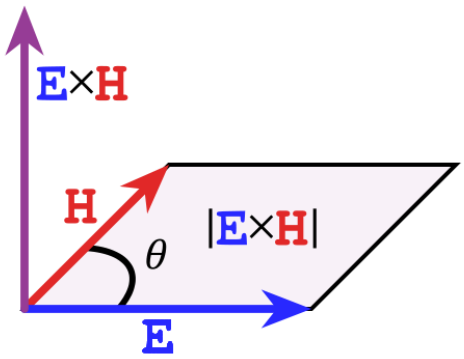


Рис. 2.9. *Вектор Умова-Пойтинга*

Зазначимо, що формулу (2.1) для стислості і симетрії в літературі зазвичай записують так (вважаючи, що початкова фаза дорівнює нулю):

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos[\varpi t - kr],$$

де ϖ – кругова частота, $k = 2\pi / \lambda$ – хвильове число.

ЕМВ буває *когерентним*[8] і *некогерентним*. Когерентне випромінювання характеризується тим, що має постійне значення початкової фази, яке, наприклад, дорівнює нулю. Звідси випливає, що, крім амплітуди когерентного сигналу, можна виміряти його фазу і тим самим визначити пройдений хвилею шлях. Початкова фаза некогерентного випромінювання безперервно змінюється випадковим чином і не може нести інформацію. Крім того, некогерентне випромінювання, як правило, є неполяризованим. Тому тут вимірюваною величиною слугує тільки інтенсивність (яскравість) випромінювання. Радіохвилі (а також лазерне випромінювання) є когерентними хвилями, тоді як випромінювання Сонця є за своєю природою некогерентним, отже, і відбиті земною поверхнею хвилі оптичного діапазону також будуть некогерентними.

Частоту вимірюють у герцах (Гц). Один ***герц – це частота, що дорівнює одному циклу коливання за секунду.***

Важливими параметрами коливальних процесів є також *амплітуда коливання* та *період коливання* (рис. 2.10).

Амплітуда коливань – це фізична величина, що дорівнює максимальній відстані, на яку відхиляється тіло від положення рівноваги під час коливань.

Амплітуда – розмах коливання електричного поля.

На рис. 2.10 амплітуда коливань позначена символом *A*. Квадрат амплітуди пропорційний енергії, що передається ЕМВ.

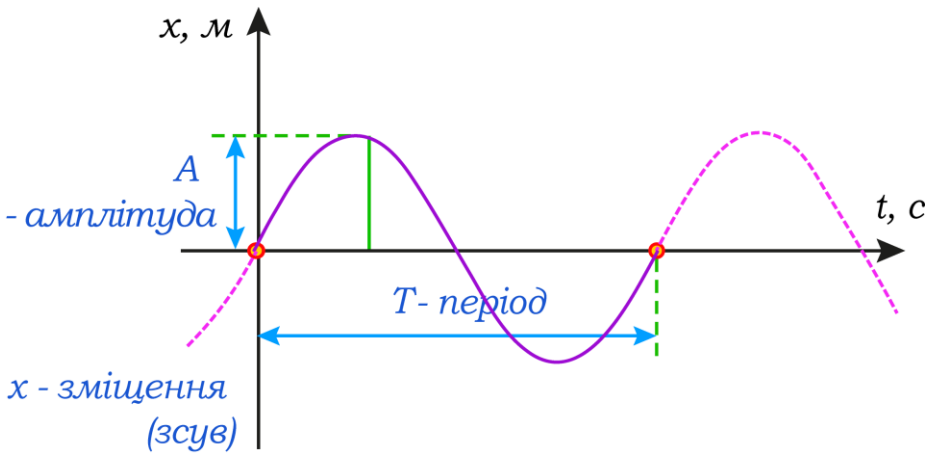


Рис. 2.10. *Графічна ілюстрація амплітуди та періоду коливання ЕМХ*

Період коливання (T) – час, протягом якого здійснюється одне коливання.

Будь-яка хвиля поширюється від однієї точки до іншої не миттєво, а з певною швидкістю:

[8] **Когерентність** – це властивість хвилі зберігати свої частотні, поляризаційні й фазові характеристики.

$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}},$$

де ε та μ – діелектрична і магнітна проникності речовини;
ε_0 – електрична проникність вакууму (*electric permittivity of vacuum* або *vacuum permittivity*), або електрична стала (*electric constant*), $\varepsilon_0 = 8{,}85419 \cdot 10^{-12}$Ф/м;
μ_0 – магнітна проникність вакууму (*magnetic permittivity of vacuum* або *vacuum permeability*), або магнітна стала (*magnetic constant*), $\mu_0 = 1{,}25664 \cdot 10^{-6}$Гн/м.

Швидкість ЕМХ у вакуумі ($\varepsilon = \mu = 1$) дорівнює:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 2{,}99792458 \cdot 10^8 \approx 3 \cdot 10^8 \, м/с.$$

Швидкість поширення ЕМХ у вакуумі c є однією з фундаментальних фізичних сталих.

В інших середовищах швидкість поширення ЕМХ менше за швидкість у вакуумі. Зменшення швидкості світла при проходженні його через середовище атмосфери або якусь речовину пояснюється періодичною поляризацією атомів або молекул середовища, при цьому частина енергії випромінювання поглинається середовищем.

Таким чином, *швидкість розповсюдження ЕМХ залежить від властивостей середовища і зменшується при переході випромінювання із вакууму в інше середовище.*

Крім перерахованих вище характеристик, ЕМВ характеризується ще *інтенсивністю*, *поляризацією, спектральним складом* і *напрямком поширення*.

Якщо на шляху ЕМВ зустрічаються матеріальні тіла, то спостерігаються такі явища, як *заломлення*, *інтерференція*, *дифракція*, *відбиття*, *розсіювання*, які описуються на основі хвильової теорії.

Явища *випромінювання* і *поглинання* атомами та молекулами описуються квантовою теорією, яка розглядає випромінювання як потік матеріальних частинок – фотонів (квантів).

Квантова (корпускулярна) модель розглядає ЕМВ як потік *квантів випромінювання* або *фотонів,* що характеризуються певною енергією E, яка вимірюється в джоулях (Дж) і залежить від частоти випромінювання.

Зв'язок енергії фотона з хвильовими характеристиками електромагнітних коливань описується співвідношенням:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \qquad (2.4)$$

де h – стала Планка або квант дії, фундаментальна фізична стала ($6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

Очевидно, що чим менша довжина хвилі або більша частота, тим вища енергія. Ось чому УФ-випромінювання Сонця, яке має довжину хвилі меншу за видиме світло, обпікає нас.

Таким чином, енергія одного фотона прямо пропорційна частоті і обернено пропорційна довжині хвилі ЕМВ.

Величини λ, ν або E однозначно характеризують вид електромагнітного випромінювання. Знаючи одну з цих величин, можна за формулами (2.2–2.4) розрахувати дві інші.

ЕВ характеризується ще однією величиною – *потужністю потоку випромінювання* (Дж/с), яку називають *інтенсивністю I*.

$$I = \frac{dE}{dt}.$$

З точки зору корпускулярної теорії, ***інтенсивність (щільність потоку) випромінювання – енергія (W), що переноситься через поверхню в 1 м^2 за 1 с, тобто потужність, що перенесена через одиничний переріз (S) за одиницю часу, або кількість фотонів енергії, яка випромінюється за 1 секунду.***

З точки зору хвильової теорії, *інтенсивність випромінювання* визначається амплітудою електричного і магнітного полів певної частоти коливань.

ЕМВ, що складається з електромагнітних коливань певної довжини хвилі, називається *монохроматичним*. У природі монохроматичне випромінювання зустрічається рідко. Зазвичай випромінювання складається з електромагнітних коливань різних довжин хвиль, тобто є *поліхроматичним*.

Якщо виокремити площину S (рис. 2.11), орієнтовану перпендикулярно напрямку поширення хвилі, то за час Δt через площину протече енергія $\Delta W_{ем}$, що дорівнює:

$$\Delta W_{ем} = (w_e + w_m)\upsilon S\Delta t;$$

$$I = \frac{1}{S}\frac{\Delta W_{ем}}{\Delta t} = (w_e + w_м)\upsilon .$$

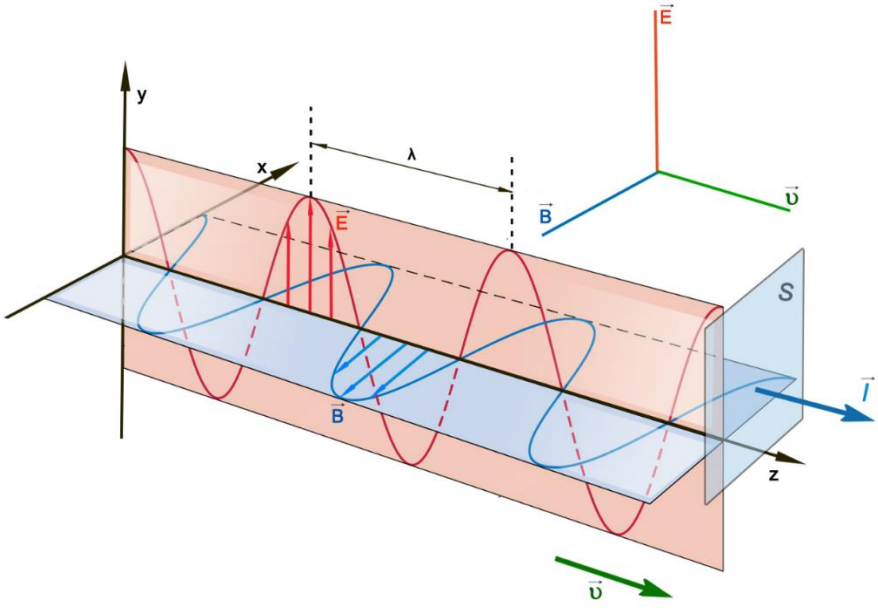


Рис. 2.11. *Графічна ілюстрація інтенсивності ЕМХ*

Якщо позначити $\overline{\omega} = \frac{1}{S}\frac{\Delta W_{ем}}{\Delta t} = (w_e + w_м)$, то інтенсивність ЕМХ J можна виразити формулою:

$$J = \overline{\omega} \cdot \upsilon,$$

де $\overline{\omega}$ – щільність енергії електромагнітного поля;
υ – швидкість поширення ЕМХ.

Підставляючи сюди вирази для w_e, $w_м$ та υ, можна отримати:

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}}E^2 = \frac{EB}{\mu\mu_0}.$$

При цьому швидкість υ характеризується залежністю:

$$\upsilon = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}},$$

де c – швидкість світла;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}.$$

Таким чином, ***чим більша щільність енергії і більша швидкість, тим вища інтенсивність ЕМВ***. Ця залежність є однією з визначальних для опису процесів аерокосмічного зондування Землі.

Щільність потоку енергії в міжнародній системі вимірів СІ вимірюється у ватах на квадратний метр (Вт/м^2).

Загальна потужність ЕМХ, що випромінює Сонце, дорівнює $4 \cdot 10^{23}$ кВт. На Землю надходить (на відстані 149,6 млн км) вже 1,4 Вт/м^2. Ця величина називається *сонячною сталою*. До земної поверхні надходить приблизно 43 % від випромінювання Сонця.

ЕМХ притаманне явище *поляризації*. Поляризація ЕМХ (поляризація світла) – це опис просторової орієнтації електричної складової частини ЕМХ – вектора напруженості електричного поля.

Поляризація ЕМХ – явище порушення симетрії розподілу збурень у поперечній хвилі (наприклад, напруженостей електричного або магнітного полів в ЕМХ) відносно напрямку її поширення (рис. 2.12).

Площина, в якій відбувається коливання електричного поля, називається *площиною поляризації*.

ЕМХ називається *неполяризованою*, якщо коливання електричного вектора E хаотичні. Якщо ЕМХ спрямовані точно в одному напрямку в площині, перпендикулярній до вектора швидкості розповсюдження хвилі, таке коливання називається *лінійно поляризованим*.

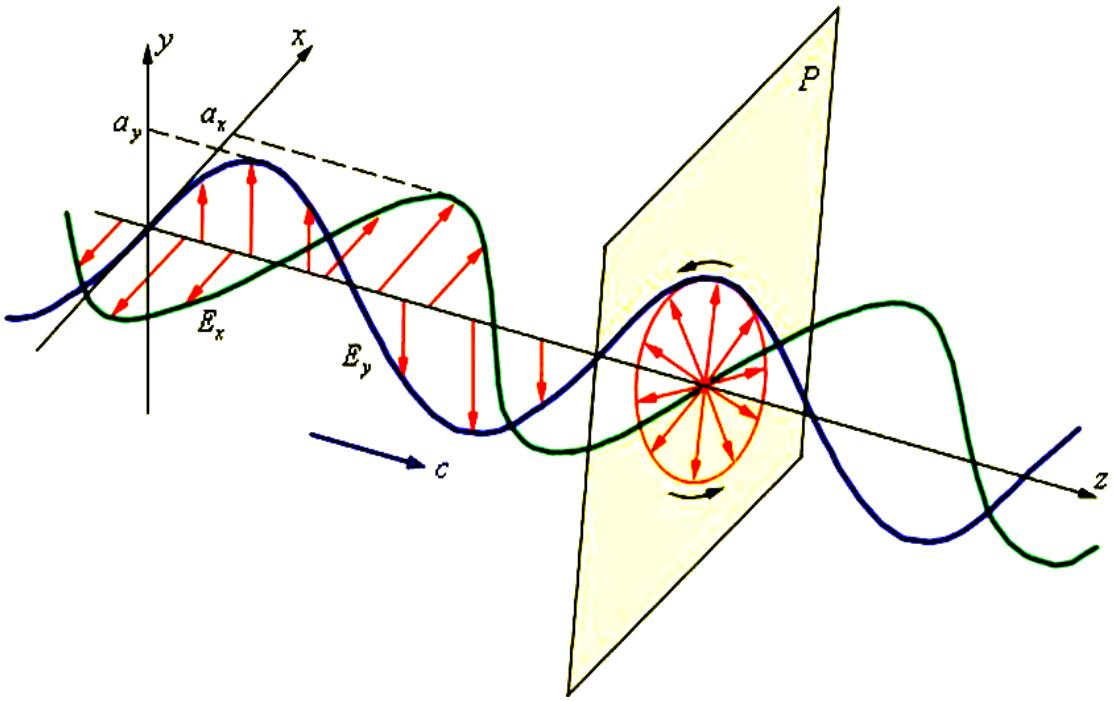


Рис. 2.12. *Графічна ілюстрація явища кругової поляризації*

Площина, в якій коливається магнітний вектор *E,* називається площиною коливань лінійно поляризованої хвилі, а нормальна до неї площина, в якій коливається магнітний вектор *H*, – площиною поляризації. За різних амплітуд і випадкового зсуву фаз проєкція електричного вектора на площину, перпендикулярну до напрямку поширення, описує еліпс.

Така хвиля називається *еліптично поляризованою* (рис. 2.13).

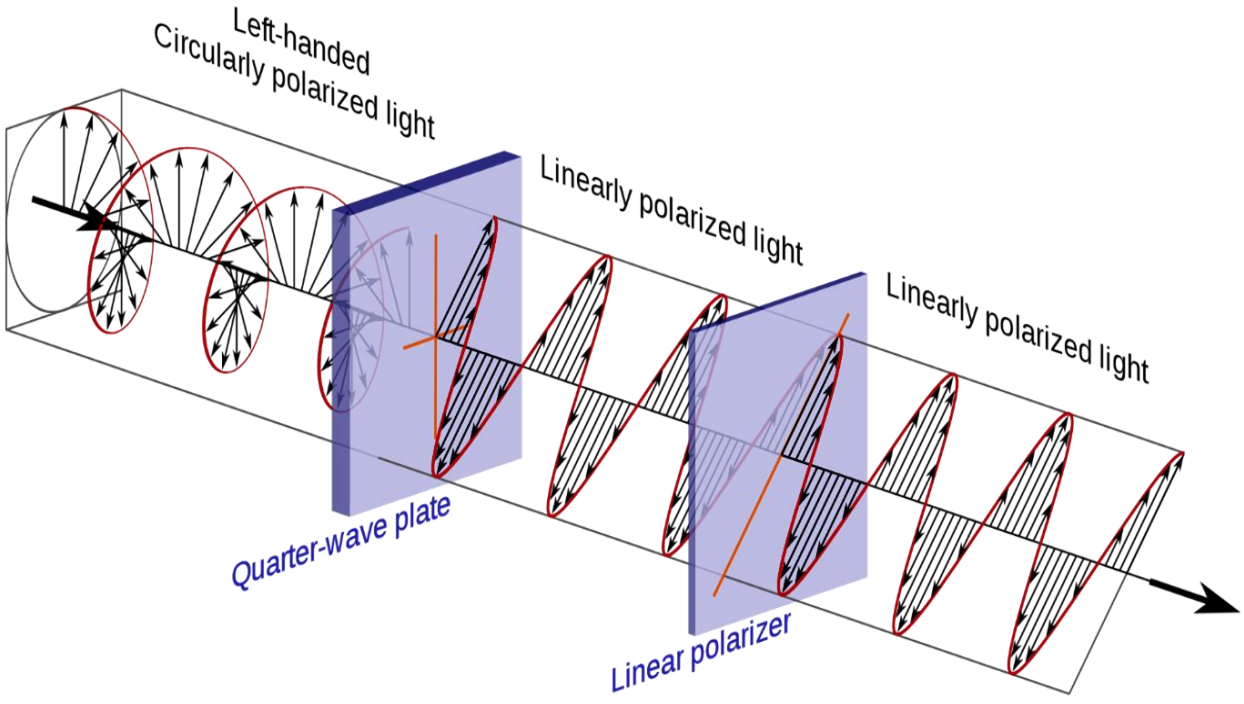


Рис. 2.13. *Графічна ілюстрація лінійної поляризації*

За рівних амплітуд форма еліпса залежить тільки від різниці фаз взаємодіючих коливань. Якщо різниця фаз становить $\pi/2$, еліпс перетворюється на коло, а результуюче коливання називається поляризованим по колу. Якщо різниця фаз дорівнює 0 або π, то еліпс перетворюється на пряму лінію і результуюче коливання стає лінійно поляризованим [65]. У поздовжній хвилі поляризація виникнути не може, оскільки збурювання в цьому типі хвиль завжди збігаються з напрямком поширення.

2.3. Взаємодія електромагнітного випромінювання з речовиною

Взаємодія ЕМВ з речовинами – це взаємодія електромагнітного поля, що коливається з високою частотою, з електронами, атомами і молекулами речовин, які знаходяться в цьому полі.

Для опису процесів поглинання та емісії світла необхідне уявлення про корпускулярну природу ЕМВ.

При поширенні через середовище – прозорий шар твердого тіла, рідини чи газу – ЕМХ взаємодіє з речовиною, змінюючи її енергетичний стан. Ця взаємодія відбувається шляхом селективного (вибіркового) поглинання (абсорбції) речовиною фотонів – квантів енергії ЕМВ. Під час поглинання окремий атом, іон чи молекула, взаємодіючи з фотоном, збільшує свою енергію на величину, яка дорівнює енергії фотона, і переходить із основного енергетичного стану (E_0) у збуджений (E_1):

$$E_0 + h\nu = E_1 .$$

Згідно з квантовою теорією, можливі енергетичні стани частинки дискретні і визначаються природою частинки, її оточенням і фізичним станом речовини.

Таким чином, при кожному акті поглинання фотона внутрішня енергія речовини збільшується дискретно – на величину енергії кванта світла. Якісну картину поглинання випромінювання можна отримати, розглядаючи поглинання видимого світла. Ми бачимо об’єкти забарвленими, тому що вони пропускають або відбивають тільки частину видимого спектра.

Коли поліхроматичне випромінювання (біле світло – весь спектр довжин хвиль із видимого діапазону) проходить крізь прозорий об’єкт, останній поглинає випромінювання певних довжин хвиль і пропускає інше. Випромінювання, яке пройшло крізь об’єкт, сприймається як колір. Цей колір є додатковим до кольору поглинутого випромінювання.

Колір визначається впливом на зоровий апарат всіх світлових променів видимої ділянки спектра без урахування поглинутих. Окремі вузькі ділянки спектра видимого випромінювання дають колірне відчуття семи основних кольорів і безлічі різних відтінків між ними.

Аналогічно непрозорі об’єкти поглинають частину випромінювання і відбивають іншу, яка і створює колір об’єкта.

Емісія випромінювання спостерігається тоді, коли частинка, що перебуває у збудженому стані, переходить у стан з меншою енергією. При цьому надлишок енергії вивільняється у вигляді фотона.

Для переведення частинки в збуджений стан можна використовувати поглинання випромінювання від зовнішнього джерела, високу температуру (в полум’ї або плазмі), електричну іскру, бомбардування електронами або іонами та інші методи.

Проходження світла крізь оптично густе середовище (наприклад, повітря) супроводжується зменшенням швидкості розповсюдження ЕМВ.

Оскільки частота випромінювання при цьому залишається постійною, змінюється довжина хвилі. Приклад, наведений на рис. 2.14, свідчить, що при переході видимого ЕМВ з повітря в скло довжина хвилі зменшується приблизно на 0,200 мкм.

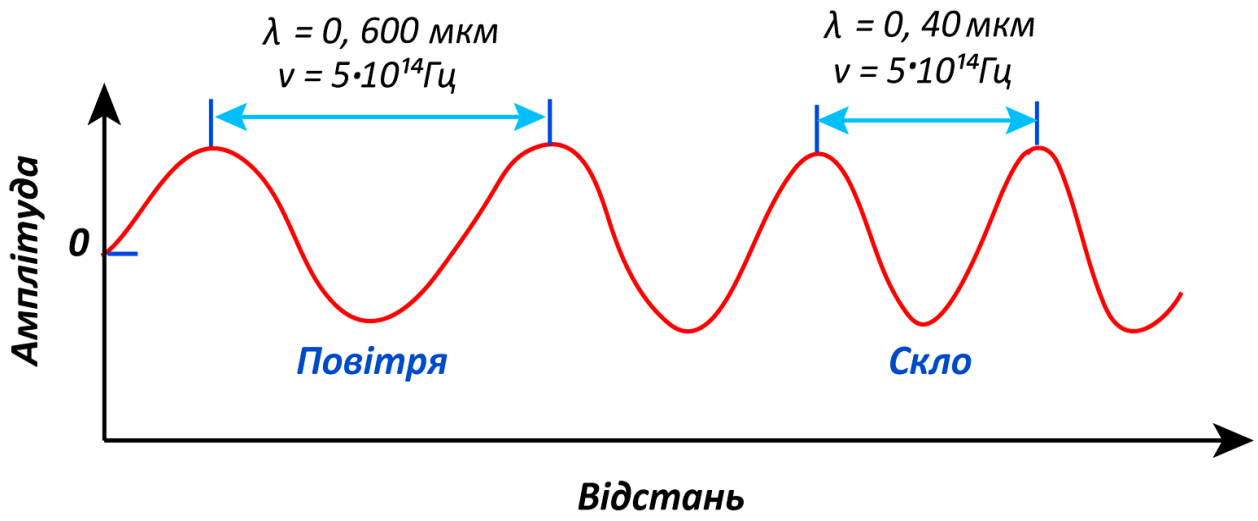


Рис. 2.14. *Зміна довжини хвилі монохроматичного випромінювання при проходженні його крізь скло*

Зменшення швидкості світла при проходженні його крізь середовище речовини пояснюється періодичною поляризацією атомів або молекул середовища, при цьому частина енергії випромінювання поглинається середовищем.

2.4. Діапазони електромагнітного випромінювання Сонця, що використовуються в ДЗЗ

У нормальному (не збудженому) стані частинки речовини (атом, молекула, іон) володіють мінімальною енергією. При збудженні вони переходять у стан із збільшеним запасом енергії і перебувають у ньому якийсь визначений час, після чого повертаються у початковий стан, віддаючи надлишкову енергію у вигляді ЕМВ. Кожному можливому переходу між рівнями енергії відповідає певна

монохроматична спектральна лінія, яка характеризується в спектрі певною частотою або довжиною хвилі.

Перехід частинки речовини (атома, молекули) з одного енергетичного стану в інший супроводжується випусканням або поглинанням кванта ЕМВ. Частота і довжина хвилі спектральної лінії визначається виразом:

$$\upsilon = \frac{c}{\lambda} = \frac{E_i - E_j}{h},$$

де E_i і E_j – енергії вихідного і кінцевого стану частинки;
h – стала Планка;
c – швидкість світла.

Спектр – класифікована довжин хвиль, частот або енергій фотонів, з яких складається випромінювання, випущене або поглинуте частинками речовини.

Якщо спектр зумовлений переходами, при яких $E_i > E_j$, то його називають *спектром випромінювання*. Спектр поглинання, або абсорбційний спектр, виникає у випадку переходів, у яких $E_i < E_j$.

Випромінювання і поглинання атомами ЕМХ пов'язане з переходами електронів з одних енергетичних рівнів на інші.

Сукупність переходів з нижніх рівнів на верхні дає спектр поглинання, з верхніх рівнів на нижні – спектр випускання. Таким чином, в атомах істотну роль відіграє тільки рух електронів. У молекулах поряд з рухами електронів істотну роль відіграють коливальний і обертальний рухи молекули.

Принципової різниці між окремими випромінюваннями немає. Спектр безперервний. Його поділ має умовний характер; межі між різними частинами електромагнітного спектра не точні, суміжні ділянки можуть перекриватись.

Електромагнітні хвилі умовно ділять на діапазони. Оскільки точної градації діапазонів не існує, то у різних авторів існують певні розбіжності у їх визначенні.

1. Гамма-випромінювання – короткохвильове випромінювання з довжиною хвилі $\lambda < 5 \cdot 10^{-3}$ нм ($\lambda < 5 \cdot 10^{-12}$ м). Довжина пробігу гамма-променів є різною у різних середовищах. У повітрі вона становить близько 1 км, у воді – кілька метрів, у гірських породах – менше 1 метра. Космічне гамма-випромінювання практично все (виняток найбільш високоенергетична частина) поглинається атмосферою і поверхні Землі не досягають.

2. Рентгенівське випромінювання ($5 \cdot 10^{-3} \le \lambda < 1$ нм). Космічне рентгенівське випромінювання активно поглинається в атмосфері вже на висотах біля 100 км і вище. Поверхні Землі космічні рентгенівські промені не досягають.

3. Ультрафіолетове випромінювання (λ = 1–400 нм). Короткі ультрафіолетові хвилі повністю поглинаються атмосферою. Близько 90% жорсткого випромінювання з довжинами хвиль 280–320 нм поглинається озоном. Більшість хвиль з довжинами 320–400 нм досягає поверхні Землі.

4. Видиме випромінювання (λ = 400–750 нм). Видимий діапазон, у якому людське око спроможне виділяти колірні відмінності, поділяють на сім колірних зон з наступними назвами кольорів і границями.

– фіолетовий (λ = 400 – 450 нм);
– синій (λ = 450 – 480 нм);
– блакитний (λ = 480 – 500 нм);
– зелений (λ = 500 – 560 нм);
– жовтий (λ = 560 – 590 нм);
– помаранчевий (λ = 590 – 620 нм);
– червоний (λ = 620 – 750 нм).

В табл. 2.2 подано діапазон довжин хвиль у видимій зоні спектра.

Таблиця 2.2

Кольори й інтервали довжин хвиль у видимій зоні спектра [71]

Колір	***Діапазон довжин хвиль, нм***	***Діапазон частот, ТГц***	***Діапазон енергії фотонів, еВ***
Фіолетовий	*400–440*	*790–680*	*2,82–3,26*
Синій	*440–485*	*680–620*	*2,56–2,82*
Блакитний	*485–500*	*620–600*	*2,48–2,56*
Зелений	*500–565*	*600–530*	*2,19–2,48*
Жовтий	*565–590*	*530–510*	*2,10–2,19*
Помаранчевий	*590–625*	*510-480*	*1,98–2,10*
Червоний	*625–740*	*480–405*	*1,68–1,9*

Основні спектральні канали оптико-електронної апаратури КА ДЗЗ та можливе застосування отриманої в них інформації зображено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Основні спектральні канали оптико-електронної апаратури КА ДЗЗ і можливе застосування отриманої в них інформації

Канал	***Застосування***
1	*2*
Видимий синій / Blue (violet), band 0, ВО. Л= 420-550 (0,42-0,55 мкм)	*Отримані дані використовуються для океанографічних додатків і проведення атмосферних корекцій даних ДЗЗ, зокрема, при обчисленні деяких індексів озелененості*

Продовження табл. 2.3

1	*2*
Видимий синій / Blue bandl, B1 \=0,45–0,52*	*Зона призначена для відображення узбереж, батиметрії, наносів; диференціації ґрунту від рослинності і листяної від хвойної флори, картографування типів лісу, виявлення штучних споруд. У меншому ступені вона підходить для оцінок вегетації і вивчення хвойних лісів. В ній добре фрагментуються структурні гірські породи (наприклад, сланці, фосфати, евапорити, евопорати), що сильно розсіюють синє світло в цій зоні іноді – в зоні 2, тобто в зеленій. Атмосферні ефекти основний вклад вносять у видимій частині спектра – понад 70% розсіяного випромінювання припадає саме на зону спектра bandl*
Видимий Зелений / Green band2, B2 0,52-0,60	*Зона відповідає максимальному коефіцієнту відбиття зеленої (здорової) рослинності і використовується для таксації лісу. Також використовується для ідентифікації штучних об'єктів місцевості і складання карт концентрації наносів і опадів в каламутних водах. Вона краще підходить для виявлення гірських порід, багатих на 2-валентне (закисне) залізо порівняно з 3-валентним*
Видимий Червоний / Red band3, B3 0,63-0,69	*Зона потрібна для розрізнення безлічі різновидів рослин, оскільки містить смугу поглинання хлорофілу. Зміщення цієї смуги по спектру може застосовуватись для визначення видового складу рослин. Також вона використовується для визначення меж ґрунтів і геологічного оконтурювання (покладів, рудного тіла, нафтових полів), штучних об'єктів. Вона краща для гірських порід і ґрунтів, багатим на залізо, особливо 3 валентне*

**Примітка*. Варто зазначити, що на сайтах компаній (агентств), які є виробниками і/або операторами різних КА ДЗЗ, крім океанографічних додатків і проведення атмосферних корекцій даних ДЗЗ, практично не розкриваються інші додатки і задачі, в яких для спостереження поверхні Землі застосовуються сині канали оптичної ча стини спектра бортової оптико-електронної апаратури КА. Проте вони є наявними майже на всіх КА ДДЗ і відтворюються на заявлених до запуску і оголошених як проєктовані.

Причому, якщо розглянути тенденцію в розвитку оптико-електронної апаратури космічних апаратів, можна виокремити такі особливості:

– SeaWiFS КА SeaStar, OrbView-2, Vegetation 1 КА SPOT 4 і Vegetation 2 КА SPOT 5 (розрізнення 1 км) мають доволі вузький блакитний спектральний канал B0 = 430–470 нм (0,43–0,47 мкм);

– AVNIR-2 КА ALOS має спектральний канал 42–500 нм (0,42-0,50 мкм) (розрізнення 10 м);

– ALI КА EO-1 – 430-450 нм (0,43–0,453 мкм) (розрізнення 30 м) поряд зі звичайним band1;

– КА Pleiades-HR 1,2 повинен мати синій (широкий) спектральний канал 430–550 нм (0,430–0,550 мкм);

– КА WorldView-2 – 423–453 нм (0,423–0,453 мкм).

При цьому варто зазначити, що оптико-електронна апаратура останніх двох КА – високого розрізнення. Тобто ширина синього каналу зростає з 30 до 300 нм (0,03 мкм до 0,3 мкм) і розробники весь час підвищують просторове розрізнення, оскільки цього вимагають замовники даних ДЗЗ.

5. Інфрачервоне випромінювання λ=750–2350 нм (0,75–2,5 мкм). Діапазон інфрачервоного випромінювання поділяють на піддіапазони (табл. 2.4).

Таблиця 2.4.

Абревіатура	***Довжина хвилі***	***Характеристика***
NIR	*0,75–1,4 мкм*	*Визначається за поглинанням електромагнітного випромінювання водою і зазвичай використовується в оптоволокні через низькі втрати в склі. Підсилювачі яскравості зображення чутливі до цієї зони спектра. Приклад: прилад нічного бачення*
SWIR	*1,4–3 мкм*	*Поглинання електромагнітного випромінювання водою значно зростає при 1450 нм. Діапазон 1530–1560 нм використовується в далекому зв'язку*
MWIR	*3–8 мкм*	*Діапазон 3-5 мкм відповідає викиду реактивного двигуна літака, що дозволяє створювати самонавідні ракети*
LWIR	*8–15 мкм*	*Діапазон, у якому датчики можуть отримати повністю пасивне зображення на основі теплових викидів, без потреби в додатковому освітленні, такому як сонце, місяць або інфрачервоні підсвітлювачі*
FIR	*15–1 000 мкм*	*Частина спектра дальнього інфрачервоного випромінювання*

Ближній інфрачервоний / Near InfraRed band4, B4, NIR 750–900 нм (0,75–0,9 мкм). Зона дуже чутлива до кількості вегетаційної біомаси, що зображена сценою зйомки.

Це корисно для ідентифікації сільськогосподарських ґрунтів / культур, оцінки урожайності, а також для визначення берегових ліній водних об’єктів на місцевості (за контрастом води / ґрунту).

Максимум інтенсивності випромінювання хлорофілу від здорової рослинності реєструється в характеристиці "червоної межі" за різницею між сигналами в 3 і 4 зонах спектра. Рослинність, що забруднена нафтопродуктами, може також показати вимірне зміщення на "червоній межі". За відсутності рослинності співвідношення сигналів у діапазоні з 1 до 5 канали показує відношення вмісту в гірських породах і мінералах 2-валентного заліза до 3-валентного.

Короткохвильовий інфрачервоний / Short Wave Infrared (Middle InfraRed) band5, B5, SWIR, MIR 1,55–1,75. Зона, чутлива до вмісту води в рослинності і ґрунтах, оцінка якої є корисною в стадії плодоношення, вивчення засухи і дослідження здоров’я рослин. Речовина, що містить воду, дає сигнал нижчий, на відміну від

сухої речовини. На ділянках, вільних від рослинності, в даному діапазоні спектра диференціюються відповідні різні оксиди заліза, що містяться в породах і ґрунтах, і зазвичай в ній чудово відображаються вивітрені гірські породи. Це зона – одна з небагатьох, у якій можна відрізнити хмари від снігу і льоду (низький сигнал – від снігу, інтенсивний – від хмар).

Тепловий інфрачервоний band 6, B6 TIR 10,40–12,50. Тепловий ІЧ піддіапазон використовується для визначення температури підстильної поверхні та інтенсивності теплоти об'єктів. Він призначений для оцінок урожаю "на корені" виявлення й аналізу навантажень на рослинність, застосування інсектицидів і для визначення теплового забруднення. Може також використовуватися для виявлення геотермальної активності. Доцільно використовувати для відображення темних породоутворюючих мінералів із високою густиною.

Короткохвильовий інфрачервоний / Middle InfraRed band 7, B7, MIR 2,08–2,35. Піддіапазон важливий для виділення типів геологічних порід. Він був відібраний через наявність потенціалу для розрізнення гірських порід, зміни гідротермальних зон та для інших досліджень геологорозвідки. В даному піддіапазоні спектра насичені кремнієм матеріали, пил у повітрі та оголені ґрунти часто дають відносно високий сигнал. Піддіапазон важливий для виділення меж ґрунтів та рівня зволоженості ґрунтів і рослинності.

У ближньому і середньому піддіапазонах переважає відбите (сонячне) випромінювання, а в дальньому, що іноді називають тепловим, – власне випромінювання Землі.

6. Радіохвилі (λ>1000 мкм або λ >1 мм) умовно поділяють на ультракороткі, короткі, середні, довгі і наддовгі.

Ультракороткі радіохвилі (λ = 1 мм–10 000 мм) розбивають на діапазони:

– міліметрові хвилі,

– сантиметрові хвилі,

– дециметрові хвилі,

– метрові хвилі.

Сантиметрові і дециметрові хвилі часто об'єднують у діапазон надвисоких частот, у якому виділяють ділянки, що позначаються латинськими літерами *K, X, C, S, L, P*, наприклад, близько 3 см – *X*-діапазон, 5,6 см – *C*-діапазон, 23 см – *L*-діапазон. На цих ділянках працює різна радіоелектронна апаратура супутників, кожна на строго фіксованих міжнародними угодами довжинах хвиль (або частот).

Більшість сучасних аерокосмічних методів заснована на використанні ультрафіолетових, видимих, інфрачервоних, ультракоротких радіохвиль з довжиною від 0,3 мкм до 3 м (рис. 2.15).

Основна енергія сонячного випромінювання припадає на довжини хвиль 0,3–3 мкм, тобто до межі між середнім і дальнім (тепловим) інфрачервоним діапазонами, причому максимум енергії – на хвилі завдовжки близько 0,5 мкм, а в тепловому інфрачервоному переважає власне випромінювання Землі.

На ділянці спектра, що включає ультракороткі радіохвилі (1–10 000 мм), міліметрові, сантиметрові і дециметрові хвилі виділяють у надвисокочастотний (НВЧ) діапазон, який у іноземній літературі називають мікрохвильовим.

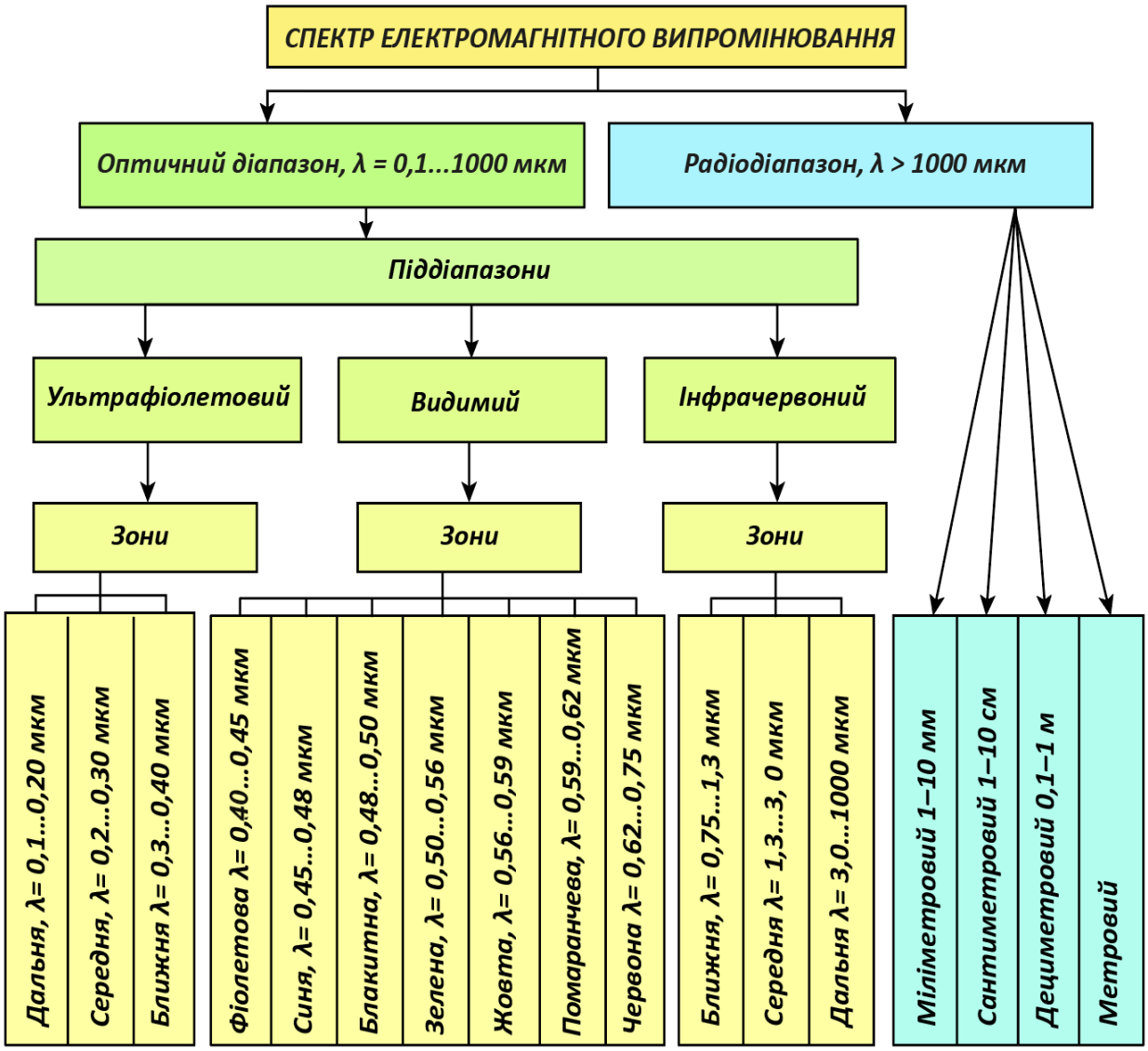


Рис. 2.15. *Діапазони електромагнітного випромінювання*

ЕМХ відрізняються одна від одної *власною частотою, довжиною хвилі* та *енергією*. Інтенсивність ЕМХ пропорційна середньому значенню добутку модулів векторів електромагнітного поля, тобто пропорційна квадрату напруженості.

При розповсюдженні хвиль виникає потік електромагнітної енергії.

Спектр зображають графічно у вигляді кривої залежності, відкладаючи на осі ординат відповідну характеристику випромінювання чи поглинання, а на осі абсцис – величину, яка характеризує енергію (частота, довжина хвилі, хвильове число).

Спектри можуть бути суцільними, смугастими та лінійчастими. Суцільні спектри характерні для розжарених твердих тіл, смугасті – для речовин у рідкому стані, лінійчасті – для речовин у газоподібному, атомарному стані. На рис. 2.16 наведено спектри випромінювання як криві залежності інтенсивності випущеного випромінювання від його довжини хвилі.

Суцільний спектр випромінювання складається з сукупності ЕМХ, довжини яких змінюються без переривання (рис. 2.16, *а*).

Смугастий спектр складається з декількох смуг, у межах яких довжини хвиль змінюються безперервно, розділених інтервалами відсутності випромінювання (рис. 2.16, *б*).

Смугасті спектри типові для молекул, що перебувають у високій температурі. Вони, на відміну від спектрів атомів, складаються з дуже великої кількості ліній, які групуються в смуги, а іноді і з широких суцільних спектральних ділянок.

Лінійчасті спектри характеризуються сукупністю випромінювання певних довжин хвиль (рис. 2.16, *в*).

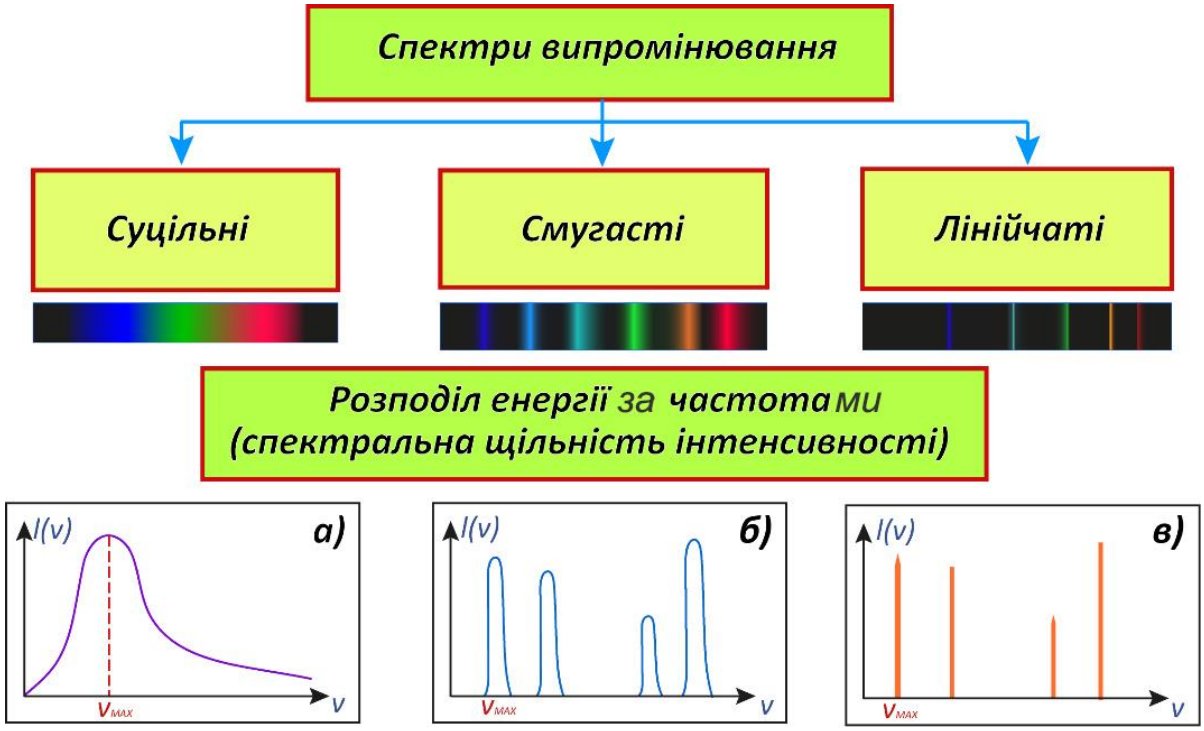


Рис. 2.16. *Види спектрів випромінювання:*
а) суцільний (безперервний), б) смугастий, в) лінійчастий

Для кожного елементу періодичної таблиці чи періодичної системи характерний свій лінійчастий спектр – набір ліній із характерними для цього елементу довжинами хвиль.

Спектри емісії і поглинання використовують для якісного (ідентифікація речовин) та кількісного (визначення вмісту речовини) аналізу. Завдяки якісному аналізу можна встановити, з яких елементів періодичної системи складається дана речовина або об'єкт. Завдяки кількісному аналізу можна встановити процентне або кількісне співвідношення елементів, які входять до складу речовини.

Для якісного аналізу найважливішою характеристикою є положення лінії, смуги в спектральному діапазоні (вісь абсцис, довжина хвилі λ, частота коливань ν). Вона визначається природою речовини і не залежить від її концентрації. Селективність виявлення залежатиме від ширини лінії та смуги. Внаслідок розширення ліній чи смуг можливе накладання сусідніх ліній і смуг сторонніх речовин.

Для кількісного аналізу використовують інтенсивність атомних ліній (випромінювання і поглинання) чи максимум поглинання смуг молекул (вісь

ординат), які є функціями концентрації речовини. Ширина лінії і смуг також має значення для правильності визначення.

Фізичні та геометричні властивості поверхні Землі (суші і моря), атмосфери, кривизна планети, окремі нерівномірності суттєво впливають на поширення радіохвиль. Наприклад, гірський хребет буде відкидати "радіотінь" у випадку коротких радіохвиль, а достатньо довгі (у декілька кілометрів) без перешкод огинають гори (явище дисперсії).

Крім того, при ДЗЗ атмосфера Землі в загальному випадку не є прозорою. Існують окремі діапазони (зони), де ЕМХ майже без перешкод долають всю товщу атмосфери, у так званих "вікнах прозорості" (найбільш інформативні піддіапазони і зони ЕМВ), де можна здійснювати зондування.

2.5. Загальні відомості про випромінювання природних об'єктів

Фізичні основи дистанційного зондування ґрунтуються на теорії випромінювання.

Джерело випромінювання – це тіло (поверхня, точка), що випромінює енергію.

2.5.1. Закони Кірхгофа

Згідно з першим законом Кірхгофа, при термодинамічній рівновазі з навколишнім середовищем усі тіла випромінюють ЕМХ. У стані термодинамічної рівноваги енергія, що поглинається за одиницю часу ділянкою поверхні, дорівнює енергії, що випромінюється в той же проміжок часу тією ж поверхнею (другий закон Кірхгофа).

Вивчаючи випромінювання, у фізиці широко використовується модель *абсолютно чорного тіла* – ідеального гіпотетичного випромінювача і поглинача, який поглинає все випромінювання, що падає на нього, нічого не відбиваючи і не пропускаючи, і випромінює максимальну енергію за даної температури. Об'єкт, що не відбиває світла, а тільки повністю поглинає його, виглядає чорним, тому його й прийнято називати *чорним тілом*.

Поняття абсолютно чорного тіла було запроваджено Г. Р. Кірхгофом у 1859 р. Хоча абсолютно чорних тіл у природі не існує, проте це поняття є надзвичайно корисним при формулюванні законів випромінювання.

Сіре тіло, на відміну від чорного, не повністю поглинає випромінювання, що падає на нього, однак рівномірно послаблює випромінювання з будь-якою довжиною хвилі.

Абсолютне чорне тіло – тіло, здатне повністю поглинати все падаюче ЕМВ, а потім знову його випромінювати [25].

Чорне тіло володіє максимальною здатністю поглинати випромінювання в будь-якому діапазоні спектра (відношення поглиненої енергії до енергії, що падає,

дорівнює 1 при випромінюваннях усіх частот, напрямків поширення і поляризації). Чорне тіло володіє і максимальною випромінювальною здатністю в будь-якій частині спектра: якщо нагріти чорне тіло до певної температури, то випромінювати з такою ж потужністю на будь-яких довжинах хвиль не зможе жодне інше тіло, нагріте до тієї ж температури, тобто воно є ідеальним випромінювачем.

Щільність енергії і спектральний склад випромінювання, що випускається одиницею поверхні абсолютно чорного тіла, залежать тільки від його температури, але не від природи випромінюючої речовини.

Загальним для сірих і чорних тіл є те, що в їх спектрах випромінювання за однакової температури збігається розподіл енергії, тобто нагріті до однакової температури чорне і сіре тіла мають однаковий процентний спектральний склад. Єдина різниця в тому, що потужність випромінювання сірого тіла менша від потужності випромінювання чорного тіла.

Моделлю чорного тіла може слугувати замкнена порожнина з невеличким отвором (рис. 2.17).

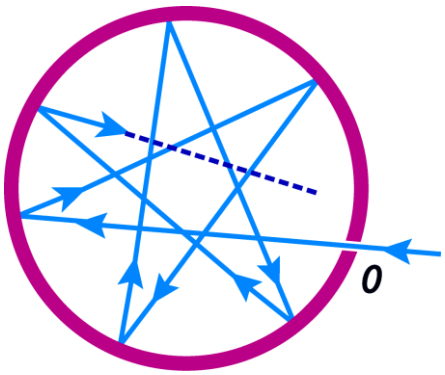


Рис. 2.17. *Модель абсолютно чорного тіла*

Модель абсолютно чорного тіла дає можливість зрозуміти, як поводить себе поглинене чорним тілом ЕМВ, що взаємодіє з атомами його речовини. ЕМВ, що падає крізь отвір всередину порожнини, після численних віддзеркалень практично повністю поглинеться стінками, і зовні отвір буде здаватися абсолютно чорним. Тут важливо зрозуміти, що ЕМВ поглинається атомом, тут же випромінюється ним і поглинається іншим атомом, знову випромінюється і поглинається. Так буде відбуватись до моменту досягнення стану рівноважного насичення, і зовні отвір буде здаватися абсолютно чорним.

Таким чином, кількість поглиненого ЕМВ кожної частоти всередині чорного тіла залишається незмінною, хоча поглинають і випромінюють його різні атоми тіла.

Але якщо порожнина нагріта до певної температури T і всередині встановилася теплова рівновага, то власне випромінювання порожнини, що виходить крізь отвір, буде *випромінюванням абсолютно чорного тіла*.

Будь-яке тіло, температура якого вища від абсолютного нуля (0 K), є джерелом ЕМВ, оскільки його молекули знаходяться в збудженому стані (тепловий

рух). Усі тіла в природі здійснюють обмін енергією шляхом випромінювання і поглинання.

З підвищенням температури всередині порожнини (рис. 2.18) буде зростати енергія випромінювання, що виходить з отвору, і змінюватися його спектральний склад.

Розподіл енергії за довжинами хвиль у випромінюванні абсолютно чорного тіла за заданої температури T характеризується *випромінювальною здатністю* $r(\lambda,T)$, що дорівнює потужності випромінювання з одиниці поверхні тіла в одиничному інтервалі довжин хвиль. Добуток $r(\lambda,T)\Delta\lambda$ дорівнює потужності випромінювання, яке здійснюється одиничним майданчиком поверхні за усіма напрямками в інтервалі $\Delta\lambda$ довжин хвиль. Аналогічно можна ввести розподіл енергії за частотами $r(\nu,T)$. Функцію $r(\lambda,T)$ або $r(\nu,T)$ часто називають *спектральною світністю*, а повний потік $R(T)$ випромінювання усіх довжин хвиль, який дорівнює

$$R(T)=\int_0^\infty r(\lambda,T)d\lambda=\int_0^\infty r(\nu,T)d\nu,$$

називають *інтегральною світністю* тіла.

Інтегральною світністю тіла R називається відношення потужності випромінювання (P) до площі поверхні випромінювача (S):

$$R=\frac{P}{S}.$$

Іноді важливо знати, як фактичне випромінювання *(W)* певного джерела співвідноситься з таким, яке можна було б очікувати від відповідного досконалого випромінювача *($W_д$)*. Це можна з'ясувати за допомогою відношення $W/W_д$, яке характеризує відносну випромінювальну здатність реального тіла ε. Тому в загальному випадку можна сказати, що

$$W=\varepsilon\, W_д.$$

Відносна випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла дорівнювала б одиниці, а у тіла, яке зовсім не поглинає ЕМВ, що до нього надходить (і з цієї причини називається "*абсолютно білим тілом*"), дорівнювала б нулю. Між цими двома граничними величинами можна оцінювати "сірість" реальних випромінювачів найчастіше до двох десятинних знаків.

Якщо порівняти графіки випромінювальної здатності реальних випромінювачів з такими ж графіками відповідних абсолютно чорних тіл, то виявили б, що в останніх вони більш плавні і прості, на відміну від тих, що спостерігаються в дійсності. Фактично коефіцієнт відносної випромінювальної здатності є мірою енергетичної віддачі випромінювача в цілому.

2.5.2. Закон Стефана-Больцмана

У 1879 р. Йозеф Стефан на основі аналізу експериментальних даних прийшов до висновку, що інтегральна світність $R(T)$ абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому ступеню його абсолютної температури:

$$W = \varepsilon\sigma T^4, \tag{2.5}$$

де W – кількість енергії;
ε – випромінювальна здатність тіла, що змінюється від 0 до 1;
$\sigma = 5{,}671 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 К^4}$ – стала Стефана-Больцмана;
T – абсолютна температура.

Теоретичне обґрунтування цього закону було надане у 1884 р. учнем Стефана, Людвігом Больцманом, після якого закон отримав назву Стефана-Больцмана.

Відповідно до закону Стефана-Больцмана, підвищення температури призводить до різкого зростання виділення енергії з одиниці площі (нагріті випромінювачі випромінюють з одиниці площі більше енергії, ніж холодні).

2.5.3. Закон Віна

Закон Стефана-Больцмана дає змогу знайти залежність інтегральної світності R від температури, але не дає відповіді відносно спектрального складу випромінювання абсолютно чорного тіла. Експериментальна залежність функції $r(\lambda,T)$ від довжини хвилі λ за різних температур (рис. 2.18) свідчить, що розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла є нерівномірним: абсолютно чорне тіло майже не випромінює енергію в діапазоні дуже малих і дуже великих довжин хвиль.

Кожна крива має чітко виражений максимум, який із підвищенням температури зміщується в зону більш коротких хвиль. Площа, обмежена кривою залежності $r(\lambda,T)$ і віссю абсцис, пропорційна енергетичній світності R і, отже, за законом Стефана-Больцмана, – четвертому ступеню його температури.

З підвищенням температури максимум зсувається в зону коротких довжин хвиль, причому добуток температури T на довжину хвилі λ_{max}, що відповідає максимуму, залишається постійним.

Цей зсув описується формулою зміщення Віна [25]:

$$\lambda_{max} = b/T \text{ або } \lambda_{max}T = b,$$

де $b = 2898 \cdot 10^{-3}$ м/К – постійна Віна.

Закон зсуву Віна наголошує, що довжина хвилі λ_{max}, на яку припадає максимум енергії випромінювання абсолютно чорного тіла, обернено пропорційна абсолютній температурі T.

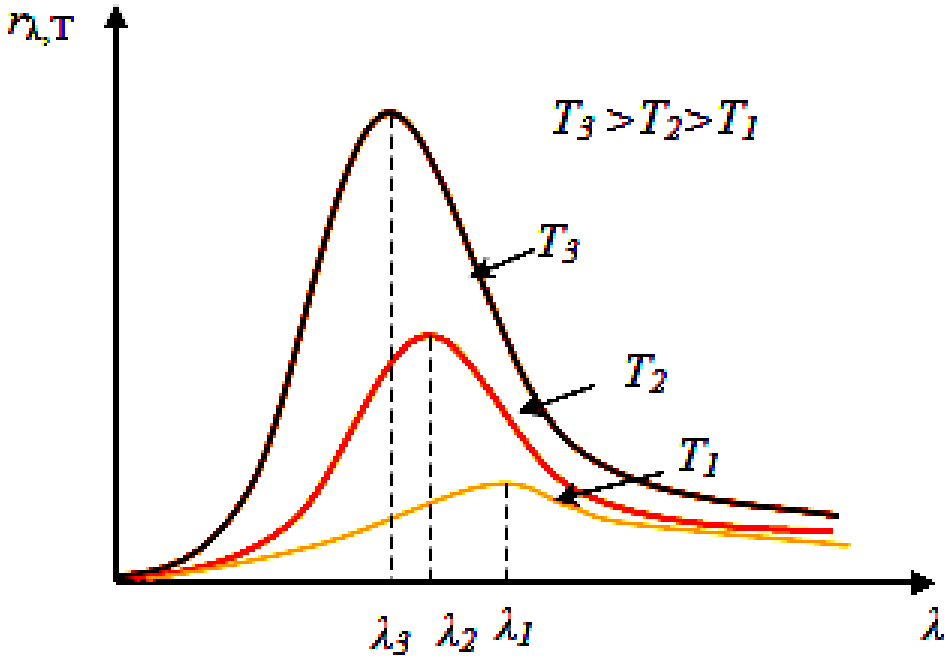


Рис. 2.18. *Залежність спектральної густини енергетичної світності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі для різних температур*

Кількість енергії, випромінюваної з одиниці поверхні, за законом Стефана-Больцмана (2.4), пропорційна четвертому степеню температури тіла. Наприклад, нагрівши певний об'єкт з 300 до 600 К, збільшимо енергію потоку W у 16 разів. Довжина хвилі максимального випромінювання при цьому стані вдвічі коротшою.

При практично досяжних в лабораторних умовах температурах максимум випромінювальної спроможності $r(\lambda,T)$ лежить в *інфрачервоній зоні*. Тільки при $T \geq 5 \cdot 10^3$ К максимум потрапляє до видимої зони спектра. Так, максимум енергії випромінювання Сонця припадає приблизно на 0,470 мкм (зелена область спектра), що відповідає температурі зовнішніх шарів Сонця близько 6200 К (якщо розглядати Сонце як абсолютно чорне тіло).

Для Землі з температурою поверхні близько 300 K у теплий день $\lambda_{max} = 9{,}0$ мкм. Емпіричні спостереження підтвердили, що довжина хвилі максимального випромінювання від Сонця потрапляє у видимий діапазон хвиль, тоді як у випадку Землі вона знаходиться в інфрачервоному діапазоні.

У першому випадку ми відчуваємо ЕМВ головним чином як світло, а в другому – як тепло.

2.5.4. Формула Релея-Джинса

Успіхи термодинаміки, що дозволили вивести закони Стефана-Больцмана і Віна, теоретично вселяли надію, що, виходячи з термодинамічних міркувань, вдасться отримати всю криву спектрального розподілу випромінювання чорного тіла $r(\lambda,T)$.

У 1900 р. цю проблему намагався вирішити знаменитий англійський фізик Д. Релей, який в основу своїх міркувань поклав теорему класичної статистичної механіки про рівномірний розподіл енергії за ступенями свободи в стані термодинамічної рівноваги. Ця теорема була застосована Релеєм до рівноважного випромінювання в порожнині. Дещо пізніше цю ідею докладно розвинув Джинс. Таким чином вдалось отримати залежність випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі λ і температури T:

$$r(\lambda,T)=8\pi kT\lambda^{-4}.$$

Це співвідношення називають *формулою Релея-Джинса*. Воно узгоджується з експериментальними даними тільки в діапазоні досить довгих хвиль (рис. 2.19).

Крім того, з формули *Релея-Джинса* випливає абсурдний висновок про те, що інтегральна яскравість $R(T)$ чорного тіла повинна обертатися в нескінченність (рис. 2.19), а отже, рівновага між нагрітим тілом і випромінюванням у замкнутій порожнині може встановитися тільки при абсолютному нулі температури.

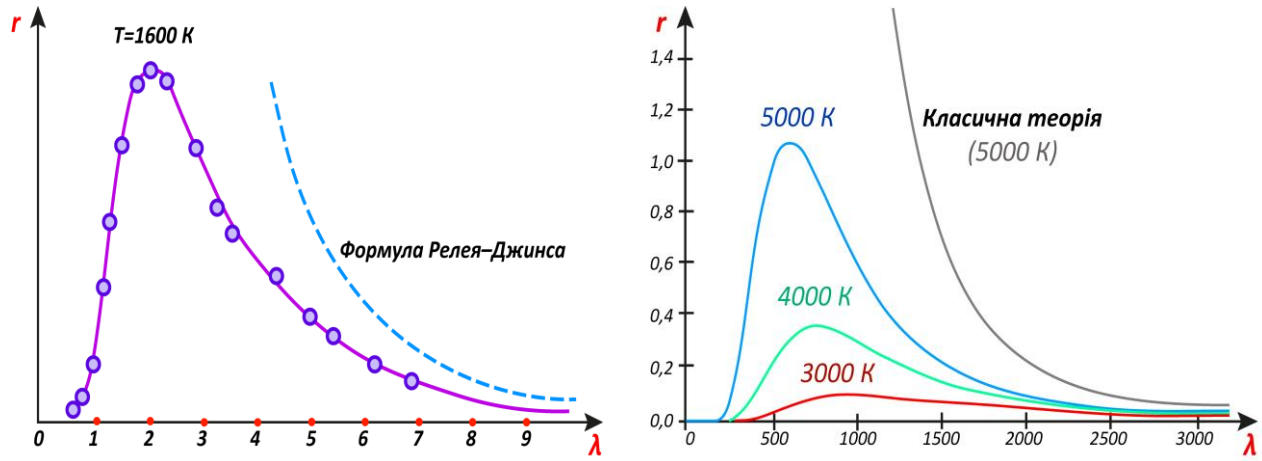


Рис. 2.19. *Порівняння закону розподілу енергії за довжинами хвиль $r(\lambda,T)$ у випромінюванні абсолютно чорного тіла з формулою Релея-Джинса при $T=1600$ К*

Таким чином, бездоганний з точки зору класичної фізики висновок призвів до формули, яка суперечить досвіду. Стало зрозуміло, що розв'язати завдання спектрального розподілу ЕМВ абсолютно чорного тіла в рамках існуючих класичних хвильових теорій неможливо.

2.5.5. Закон Планка

Це завдання успішно вирішив М. Планк на основі нової ідеї, дуже далекої від класичної фізики. Вчений прийшов до висновку, що процеси випромінювання і поглинання електромагнітної енергії нагрітим об'єктом відбуваються не безперервно, як це трактувала класична фізика, а кінцевими порціями – *квантами*.

Квант – це мінімальна порція енергії, що випромінюється або поглинається об'єктом.

За теорією Планка, енергія кванта E прямо пропорційна частоті світла:

$$E = h\nu \text{ або } E = h\frac{c}{\lambda}, \tag{2.6}$$

де h – *стала Планка (*$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с);
c – швидкість світла.

Постійна Планка – це універсальна константа, яка в квантовій фізиці відіграє ту ж роль, що і швидкість світла в класичній фізиці.

На основі гіпотези про переривчастий характер процесів випромінювання і поглинання об'єктами ЕМВ Планк отримав формулу для спектральної світності абсолютно чорного тіла. Формулу Планка зручно записувати у формі, яка виражає розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла за частотами ν, а не за довжинами хвиль λ:

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2}\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

де c – швидкість світла;
h – постійна Планка;
k – постійна Больцмана;
T – абсолютна температура.

Формула Планка добре описує спектральний розподіл випромінювання чорного тіла при будь-яких частотах. Вона прекрасно узгоджується з експериментальними даними. З формули Планка можна вивести закони Стефана-Больцмана та Віна. При $h\nu << kT$ формула Планка трансформується в формулу Релея-Джинса.

З формули 2.6 випливає, що чим більша довжина хвилі, тим менша енергія фотона. Найбільшою енергією володіє гамма-випромінювання (довжина хвилі приблизно складає 10^{-9} м), а найменшою – радіохвилі, довжина хвилі яких перевищує 1 м. Крім того, варто зазначити, що короткохвильове ЕМВ легше піддається вимірам, ніж довгохвильове.

Домінанта довжини хвилі у міру зростання температури зміщується в зону коротких хвиль, тобто енергетичний процес активізується, його інтенсивність зростає. За високих значень температури зростає вклад короткохвильового випромінювання, наприклад, пік випромінювання за температури 400 °С відповідає довжині хвилі 3 мкм, а за температури 1000 °С – довжині хвилі 2,5 мкм.

Наведені теоретичні положення описують процеси, що мають місце при дистанційному зондуванні. Наприклад, застосування квантової теорії є надзвичайно корисним при визначенні кількості енергії, вимірюваної багатозональним сенсором.

Згідно з законом Кірхгофа, випромінювальна здатність ε будь-якого тіла дорівнює його коефіцієнту поглинання при заданій температурі T і довжині хвилі λ:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T).$$

Вказівка на те, що випромінювальна і поглинальна здатність тіл стосовно ЕМХ повинна співвідноситись до конкретної однієї й тієї ж температури, є дуже важливою, бо від цього залежать висновки при порівнянні зафіксованого за допомогою ДЗЗ випромінювання від різних поверхонь.

Якщо однаково нагріті дві поверхні тіл випромінюють однаково, то вони ідентичні, а якщо по-різному, то вони відмінні. Якщо ж випромінюють з різною інтенсивністю, то вони відрізняються нагрівом – температурою.

Об’єкти, що зустрічаються в природі, не є ідеальними випромінювачами. Їхня випромінювальна здатність не може бути, як у абсолютно чорного тіла, і тому завжди є менша за одиницю. При нечорному ("сірому") випромінюванні форма кривої спектрального розподілу енергії подібна до кривої абсолютно чорного тіла (кривої Планка), але інтенсивність менша. При селективному випромінюванні такої подібності не спостерігається.

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

Усі тіла за температури вище абсолютного нуля випромінюють ЕМХ, які мають різну довжину.

Питання для самоконтролю

1. *Дайте характеристику джерел ЕМВ, що використовуються в ДЗЗ.*
2. *Які характеристики ЕМВ Вам відомі?*
3. *Як відбувається взаємодія ЕМВ з речовиною?*
4. *Дайте характеристику діапазонів ЕМВ, що використовуються при ДЗЗ.*
5. *Поясніть сутність закону Стефана-Больцмана.*
6. *Поясніть сутність закону Кірхгофа.*
7. *Поясніть сутність закону Віна.*
8. *Поясніть сутність закону Планка.*

ІІІ. ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СОНЦЯ З АТМОСФЕРОЮ ЗЕМЛІ

У практиці дистанційних досліджень виникають значні ускладнення, що викликані наявністю у нашої планети атмосфери, оскільки, з одного боку, вона є об'єктом дослідження, а з іншого, є основним джерелом викривлень і завад при дослідженні земної поверхні. Хоча на швидкість розповсюдження ЕМВ атмосфера реально не впливає, вона може змінювати деякі його характеристики, зокрема напрямок і інтенсивність випромінювання, довжину і частоту ЕМХ, що досягають поверхні Землі, спектральний склад ЕМВ.

Випромінювання перед тим, як потрапити на реєструючий сенсор, що перебуває на певній висоті над земною поверхнею, має пройти крізь атмосферу – суміш газів, у якій перебувають зважені тверді і рідинні частинки – від тонкого аерозолю до щільних хмар з усіма проміжними станами. При цьому зміни напрямку у замутненому середовищі взагалі мало передбачувані. Молекули газів і ці частинки частину випромінювання розсіюють у різні боки з довжинами хвиль, меншими від довжин ЕМХ, що надходять. Атмосферні гази дуже сильно абсорбують на певних довжинах хвиль. Як приклад можна навести поглинання ультрафіолетового випромінювання в озоновому шарі. Оскільки ЕМВ, що надходить до Землі, є комбінацією відфільтрованого і розсіяного атмосферою ЕМВ Сонця, тому, щоб правильно обрати необхідні датчики і фільтри й уникнути або зменшити вплив атмосфери на дані ДЗЗ, потрібно чітко розуміти процеси, що відбуваються в ній.

3.1. Загальні відомості про взаємодію електромагнітного випромінювання Сонця з атмосферою Землі

Для ДЗЗ одним з основних джерел ЕМВ є Сонце, температура поверхні якого дорівнює 5780 К. Сонце – центральне і наймасивніше тіло Сонячної системи. Його маса у 333 000 разів перевищує масу Землі й у 750 разів перевищує масу всіх інших планет сонячної системи, разом узятих.

Сонце – потужне джерело ЕМХ, які воно постійно випромінює в усіх ділянках спектра – від гамма-променів до радіохвиль (рис. 3.1).

Це випромінювання сильно впливає на всі тіла Сонячної системи: нагріває їх, даючи світло і тепло, необхідні для життя на Землі, позначається на атмосфері Землі й інших планет.

Сонячне випромінювання (радіація) генерується термоядерними реакціями, що відбуваються на Сонці, причому 99 % випроміненої енергії зосереджено в ультрафіолетовому, видимому й інфрачервоному діапазонах спектра (0,3–5,2 мкм).

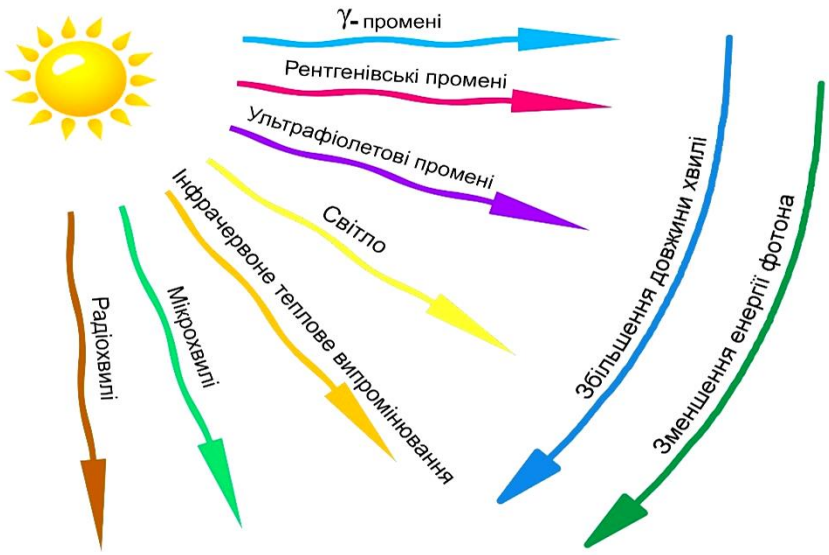


Рис. 3.1. *Електромагнітне випромінювання Сонця*

Сонячне випромінювання, розповсюджуючись зі швидкістю приблизно $3 \cdot 10^5$ км/с, вже через 8 хв майже без змін досягає верхньої межі атмосфери Землі, віддаленої від Сонця на $1{,}5 \cdot 10^8$ км. Його вихідна інтенсивність настільки велика, що навіть на такій далекій відстані вона становить 1382 Дж/м^2, або 345,5 Вт/м^2.

Енергія первинного джерела випромінювання Сонця розподілена по всьому спектру. При проходженні ЕМВ крізь атмосферу Землі його інтенсивність і спектральний розподіл змінюються. Превалюють хвилі завдовжки 0,5 мкм (зелене світло), які добре розрізняються людським оком (рис. 3.2). Потім це випромінювання взаємодіє з об'єктом і відбивається або поглинається ним.

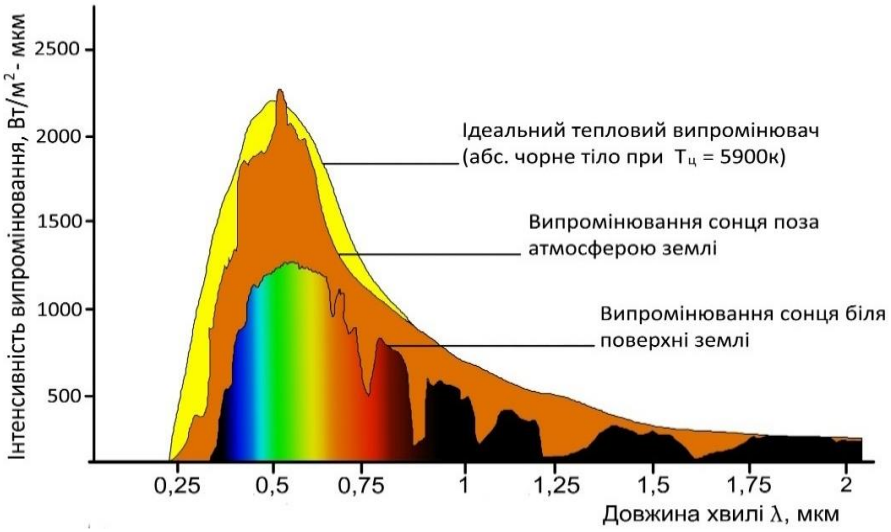


Рис. 3.2. *Інтенсивність сонячного випромінювання, що падає на Землю*

Пройшовши крізь атмосферу, Землі дістається лише мала частка сонячної енергії (Земля отримує лише $0{,}5 \cdot 10^9$ частину сонячної енергії), але й цієї енергії достатньо, щоб у десятки тисяч разів перекрити існуючу енергетичну потребу всієї земної кулі.

Відбите або випромінене ЕМВ проходить назад крізь атмосферу і знову-таки зазнає змін у спектральному розподілі й інтенсивності, після чого досягає сенсора (датчика), де воно вимірюється і перетворюється на дані для наступної обробки.

Основною проблемою кількісної інтерпретації даних ДЗЗ, отримуваних в оптичному діапазоні, є адекватне врахування трансформації ЕМВ, що проходить крізь атмосферу, або так званої атмосферної корекції.

Спектральний склад сонячного випромінювання, що надходить на Землю, залежить від пори року, погоди, географічної широти і висоти над рівнем моря. Наприклад, чим далі від екватора, тим сильніше короткохвильова межа зсувається в бік довгих хвиль, оскільки в цьому випадку світло падає на поверхню під косим кутом і проходить більшу відстань в атмосфері, а значить, сильніше поглинається.

Короткохвильова частина електромагнітного спектра сонячного випромінювання найбільш згубна для життя на Землі і включає:

– *гамма-випромінювання* (гамма-промені, γ-промені) – вид ЕМВ з дуже малою довжиною хвилі – менше $0{,}05 \cdot 10^{-3}$ мкм (частота – понад $6 \cdot 10^{19}$ Гц), яскраво вираженими корпускулярними і слабо вираженими хвильовими властивостями;

– *рентгенівське випромінювання* – ЕМХ, енергія фотонів яких лежить на шкалі ЕМХ між ультрафіолетовим і гамма-випромінюванням, що відповідає довжинам хвиль 0,05 мкм – $0{,}1 \cdot 10^{-3}$ мкм і частотам $3 \cdot 10^{16}$–$6 \cdot 10^{19}$ Гц;

– *ультрафіолетове випромінювання* – випромінювання атомів під впливом прискорених електронів (0,01–0,4 мкм).

Руйнівні для життя людини гамма-промені, ультрафіолет і рентгенівське випромінювання, що надходять від Сонця, повністю поглинаються земною атмосферою.

На положення короткохвильової межі впливає і товщина озонового шару, тому під "озоновими дірками" на поверхню Землі потрапляє більше ультрафіолету.

Якби Земля була позбавлена атмосфери, то середня температура її поверхні становила б +23 °С, а за рахунок наявності атмосфери річна температура поверхні Землі складає +14,8 °С. Атмосфера затримує також частину космічних променів і слугує "бронею" проти руйнівної дії метеоритів. Наскільки великим є захисне значення земної атмосфери, свідчить поцяткована метеоритними кратерами поверхня Місяця, позбавленого атмосферного захисту.

Внаслідок різних складних взаємодій в атмосфері до земної поверхні доходить лише частина ЕМВ Сонця (рис. 3.3), але довжина хвиль ЕМВ при цьому не змінюється.

Атмосфера вибірково проникна для різних частин спектра ЕМВ.

Атмосфера прозора для ЕМВ в діапазоні довжин хвиль 0,3–5,2 мкм (в якій міститься близько 88 % усієї енергії сонячного випромінювання) і радіодіапазоні 1 мм – 30 м. Випромінювання ІЧ діапазону ($\lambda > 5{,}2$ мкм) поглинається парами води та вуглекислим газом тропосфери і стратосфери. Непрозорість атмосфери в радіодіапазоні обумовлена відбиттям радіохвиль від її іонізованих шарів (іоносфери).

Рис. 3.3. *Взаємодія сонячного ЕМВ з атмосферою Землі*

Випромінювання ультрафіолетового діапазону (0,18–0,3 мкм) поглинається озоном на висотах 15–60 км, а хвилі 0,18–0,1 мкм і менше – азотом, молекулярним і атомарним киснем (на висоті від кількох десятків до кількох сотень кілометрів над поверхнею Землі).

Таким чином, біосфера Землі, завдяки атмосфері, виявляється захищеною від згубного впливу короткохвильового випромінювання Сонця.

У вигляді прямої і розсіяної радіації поверхні Землі досягає лише 47–51 % енергії сонячного випромінювання, що потрапляє на зовнішню межу атмосфери.

Між атмосферою і поверхнею Землі відбувається *безупинний обмін енергією* (теплообмін) і *речовиною* (вологообмін, обмін киснем та іншими газами).

Теплообмін обумовлений перенесенням теплоти випромінюванням (променевий теплообмін), передачею теплоти за рахунок теплопровідності, конвекції і фазових переходів води (випару, конденсації, кристалізації).

Вологообмін обумовлений нерівномірним нагріванням атмосфери над сушею, морем на різних висотах і в різних широтах, що спричиняє нерівномірний розподіл атмосферного тиску. А стійкі перепади тиску, що виникають в атмосфері, викликають загальну циркуляцію атмосфери, з якою і пов’язаний вологообмін, що включає процеси випаровування води з поверхні гідросфери, перенесення водяної пари повітряними потоками, випадання опадів і їхній стік.

ЕМВ Сонця проявляється різними чином: і як світло, яке ми бачимо, і як тепло, яке ми відчуваємо, і як радіохвилі, що сприймають наші радіо- і телевізійні приймачі. З фізичної точки зору, випромінювання являє собою електромагнітні коливання різної частоти, що поширюються зі швидкістю світла $c = 3 \cdot 10^5$км/с у вакуумі і з дещо меншою швидкістю у різних інших середовищах.

Людське око сприймає лише частину спектра ЕМВ, яку називають *видимим (оптичним, світловим) діапазоном* електромагнітного спектра і дозволяє оцінити яскравість у цьому діапазоні. Більша частина електромагнітного спектра людським оком не сприймається, однак випромінювання, невидиме для ока, може реєструватися іншими органами почуттів людини. Наприклад, ІЧ випромінювання сприймається шкірою людини як тепло тощо.

Прилади ДЗЗ можуть фіксувати ЕМВ в більш широкому діапазоні електромагнітного спектра та надавати колосальні об'єми інформації про стан навколишнього середовища. Головна проблема полягає в створенні сенсорів (датчиків) та алгоритмів обробки даних ДЗЗ, які б дозволили добути закладену в них інформацію.

ЕМВ може характеризуватися *енергетичними* або *спектральними* параметрами. Для кількісних характеристик взаємодії ЕМВ з об'єктами використовують як *абсолютні*, так і *відносні* характеристики. Для абсолютних вимірів використовують дві системи:

– світлова або фотометрична (в люменах) – у видимому діапазоні;

– енергетична або радіометрична (в ватах) – в усіх інших діапазонах електромагнітного спектра.

При відносних вимірах оперують коефіцієнтами *поглинання, відбиття, перенесення* й *розсіювання*, значення яких в сумі завжди становить одиницю (закон збереження енергії).

Навіть при безхмарному небі дистанційну зйомку доводиться здійснювати крізь всю товщу атмосфери[9]. Атмосфера Землі не є прозорою, а пропускає промені різних довжин хвиль селективно, подібно фільтру. Проходячи крізь атмосферу, сонячне випромінювання частково поглинається нею і переходить у тепло, нагріваючи її. Нерозсіяне й непоглинуте в атмосфері пряме сонячне випромінювання досягає земної поверхні, поглинається й нагріває її, а частково відбивається нею.

Виділяють чотири основні типи взаємодії сонячного випромінювання з атмосферою Землі (рис. 3.4):

– поглинання;

– розсіювання;

– перенесення;

– відбиття (віддзеркалення).

Інтенсивність сонячного випромінювання на поверхню Землі залежить від багатьох чинників – пори року, географічної широти (чим далі від екватора, тим вона нижча), географічно-кліматичних особливостей території, часу доби, стану атмосфери та її озонового шару, висоти над рівнем моря (зі збільшенням висоти на 300 м вона зростає на 4 %), погодних умов (хмарність, тумани), атмосферних забруднень, розміщення приймача сонячного випромінювання на Землі і його розміщення відносно Сонця тощо.

[9] Товщина атмосфери – приблизно 2000–3000 км від поверхні Землі. Сумарна маса повітря в атмосфері $5{,}1–5{,}3\times10^{18}$ кг. З них маса сухого повітря складає $5{,}1352\pm0{,}0003\times10^{18}$ кг, загальна маса водяної пари в середньому дорівнює $1{,}27\times10^{16}$ кг.

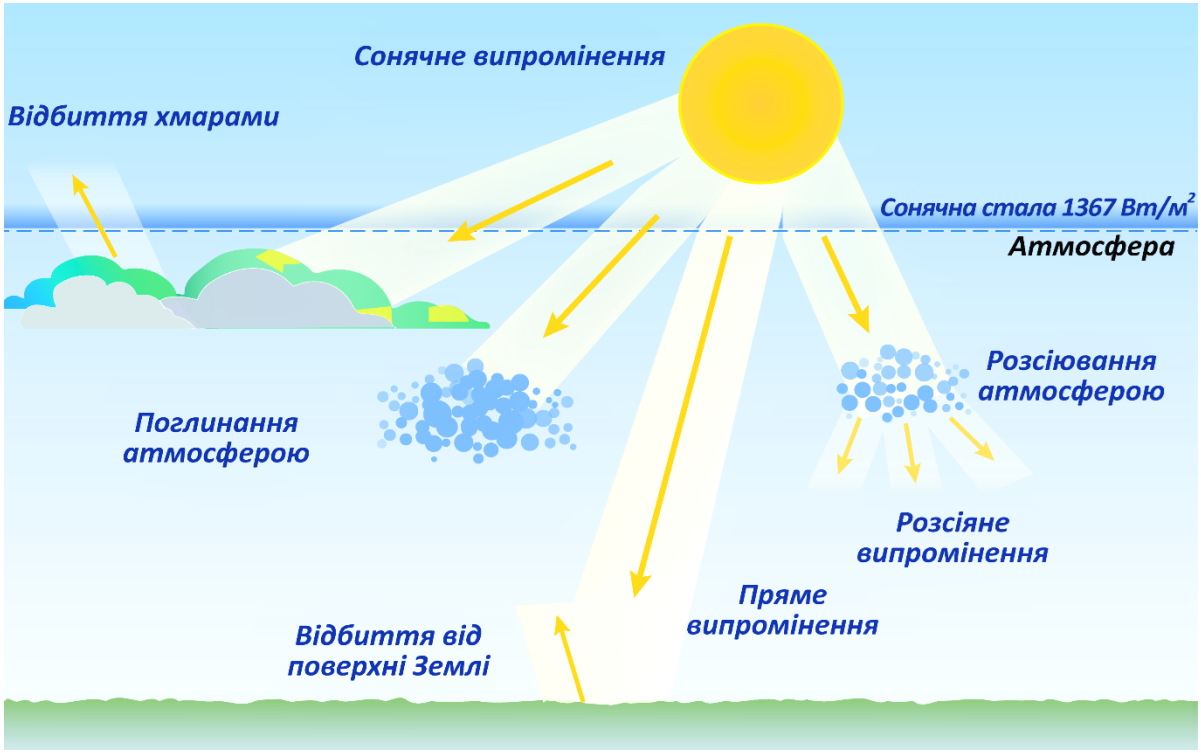


Рис. 3.4. *Взаємодія сонячного випромінювання з атмосферою*

3.2. Атмосфера Землі і її складові

Атмосфера Землі являє собою газову оболонку (геосферу), що оточує нашу планету. Внутрішня поверхня атмосфери покриває гідросферу і земну кору, зовнішня поверхня атмосфери межує з навколоземним космічним простором. Товщина атмосфери становить приблизно 2000–3000 км від поверхні Землі, сумарна маса повітря в атмосфері $(5{,}1–5{,}3)\cdot10^{18}$ кг.

Атмосфера Землі – суміш газів, серед яких азот становить 78 %, кисень 21 %, аргон 0,9 % (рис. 3.5).

Крім цих основних газів, у повітрі є в незначній кількості водень, гелій та інертні гази. До складу повітря входять також оксид вуглецю IV (вуглекислий газ), озон, метан, водяна пара, а також тверді частинки – аерозолі. Азот, кисень, водень, гелій та інертні гази за кількістю в повітрі величини сталі, решта компонентів – несталі. Через те що повітря безперервно перемішується, його хімічний склад до висоти 100 км майже однаковий. Вище переважає атомарний кисень, від 500 до 2000 км – гелій, а далі – атомарний водень.

Із сталих компонентів найважливіша роль у географічній оболонці належить кисню. Він є продуктом життєдіяльності зелених рослин. Загальна його кількість у атмосфері $1{,}5\cdot10^{15}$ тонн. Такий вміст кисню є сприятливим для існування життя на Землі. Збільшення або зменшення його концентрації були б згубними для більшості живих організмів.

Азот у повітрі служить нейтральним середовищем або розріджувачем кисню. Він бере участь у диханні, його засвоюють рослини, тварини і людина, у яких він входить до складу білків ферментів, гормонів тощо.

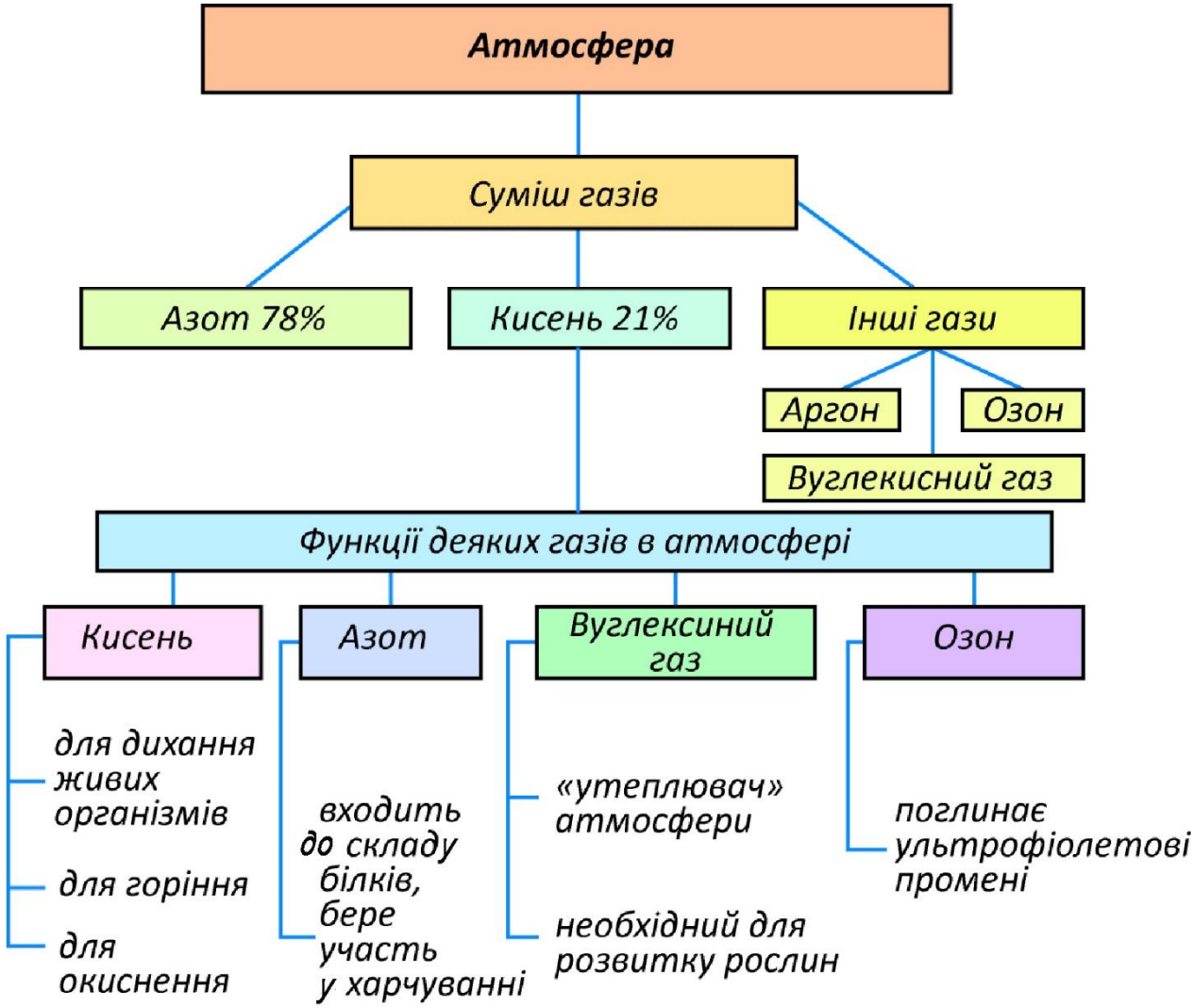


Рис. 3.5. *Складові атмосфери Землі*

З групи несталих частин атмосфери найважливішими є оксид вуглецю (IV) CO_2, озон O_3 і H_2O (водяна пара, вода в газоподібному стані). Оксид вуглецю (IV) – CO_2 (англ. *carbon dioxide*) надходить в атмосферу з вулканів, мінеральних джерел, ґрунтів, живих організмів, промислових підприємств. Через те що цей газ важкий, він зосереджений у нижніх шарах атмосфери. Над океанами у полярних районах та у сільській місцевості його мало, у містах та вулканічних областях – багато. Оксид вуглецю (IV) вважається "обігрівачем" Землі, оскільки затримує її теплове випромінювання і легко пропускає короткохвильове випромінювання Сонця.

Озон (O_3) утворюється під час електричних зарядів гроз і деяких хімічних реакцій. Проте основна його маса є продуктом розщеплення звичайного кисню ультрафіолетовими променями у високих шарах атмосфери. Під дією сонячного проміння два атоми молекули кисню розпадаються, а потім "прилипають" до інших молекул кисню і утворюють озон O_3. Загальна кількість озону в атмосфері незначна. Він зосереджується на висоті від 10 до 30 км, але найбільшої концентрації досягає на висоті 22–27 км. За температури 0 °С і тиску 10^{13} Па (760 мм рт. ст.) весь озон утворив би біля поверхні Землі шар завтовшки в 3 мм.

Озоновий шар – це своєрідна сонячна батарея і щит, який поглинає ультрафіолетову сонячну радіацію і захищає нашу планету від згубного ультрафіолетового та корпускулярного випромінювання Сонця, водночас затримує тепло, що випромінює Земля, уберігаючи її від охолодження.

Водяна пара зосереджена в нижніх шарах атмосфери. Над екватором її більше (4 %), а над полюсами – менше (0,2 %). З висотою її вміст зменшується. Якщо на висоті 2 км її в 2 рази, то на висоті 8 км у 100 разів менше, ніж біля земної поверхні.

Крім газів, до складу атмосфери входять також тверді частини – аерозолі різного походження, зокрема і космічний пил, якого в атмосфері близько 28 млн тонн.

Аерозолі (англ. *airsols,* нім. *Aerosole, Luftkolloide, aerosol Schwebstoffe*) **– *дисперсні системи, що складаються з дрібних твердих або рідких частинок (дисперсна фаза) та дисперсійного газового середовища (наприклад, повітря), де зависли ці частинки***.

Основна маса атмосфери (99,9 %) сконцентрована у шарі нижче 50 км, саме тут і відбуваються основні викривлення ЕМВ, яке проходить крізь атмосферу.

На невеликих висотах зйомки (200–400 м) атмосфера практично не змінює спектральний склад ЕМВ. Основними поглинальними елементами є водяна пара, діоксид вуглецю та озон.

Короткохвильова частина випромінювання (до 0,3 мкм) розсіюється і поглинається в найвищих шарах атмосфери, а радіохвилі завдовжки більше 20–30 м екранізуються іоносферою. Тому для ДЗЗ практичний інтерес викликає діапазон 0,3 мкм – 20 м. Тут сонячна радіація розподілена досить нерівномірно: майже 95 % усієї енергії Сонця сконцентровано в діапазоні 0,3–2,4 мкм, тобто в ультрафіолетовій, видимій і ближній інфрачервоній зонах. Максимум сонячної енергії припадає на 0,5 мкм.

Якби атмосфера складалася лише з газів, то вона була б достатньо прозорою, а видимість для світлового часу становила щонайменше 250–300 км. Однак до складу атмосфери входять, крім основних газів, водяна пара, пил, мікроорганізми тощо, які впливають на прозорість атмосфери. Реальний атмосферний аерозоль є полідисперсним, тобто складається з частинок різних розмірів. Форма цих частинок може бути різною. Одну з класифікацій аерозолів, засновану на їх розмірах (дисперсності), а також їх ролі в різних процесах, запропонував Х. Юнге [128]. Схему такої класифікації подано на рис. 3.6, де показані джерела аерозольних частинок, тривалість життя, а також інформація про їх вплив на різні атмосферні процеси.

Сонячні промені, проходячи крізь атмосферу, зіштовхуються з молекулами газу, води й пилу, *поглинаються* та розсіюються в усіх напрямках і втрачають близько 20 % своєї енергії. Особливо сильне розсіювання відбувається у приземному шарі, де концентрація водяної пари й пилу найбільша.

Спектр розмірів аерозольних частинок дуже широкий – від менше 10^4 до 10^2 мкм і більше (за радіусом). Їхня нижня межа визначається розмірами

молекулярних комплексів, а верхня – швидкістю гравітаційного осідання частинок у полі сили тяжіння.

Різні метеорологічні явища і процеси пов'язані з різними інтервалами спектра розмірів аерозольних частинок. Так, наприклад, частинки з радіусами $r < 0{,}1$ мкм (так звані "частинки Айткена") істотно впливають на електричні характеристики атмосфери. Частинки з $2 \le r \le 10$ мкм здійснюють істотний вплив на перенос короткохвильового й інфрачервоного випромінювання, формування хмар і опадів, хімічний склад атмосфери. При цьому аерозолі з розмірами $2 \le r \le 1{,}0$ мкм здійснюють найбільший вплив на перенесення короткохвильового випромінювання, видимість в атмосфері.

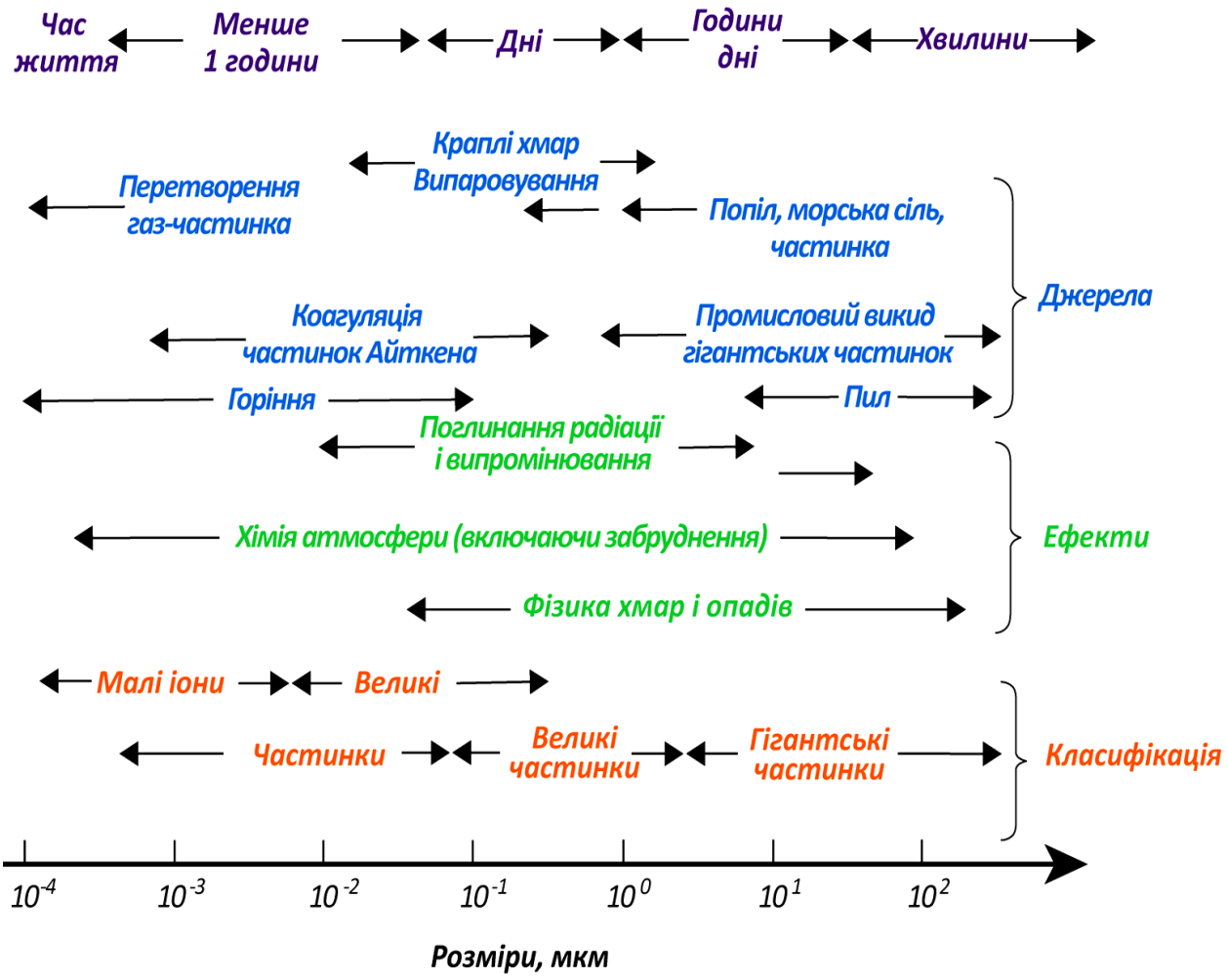


Рис. 3.6. *Характерні розміри частинок, що містяться в атмосфері Землі*

Кількісна концентрація аерозолів дуже сильно варіює і залежить від висоти в атмосфері, близькості до джерел аерозолів (наприклад, у місті вона у декілька разів вища, ніж на відстані від нього), часу доби. Зі зростанням висоти в атмосфері концентрація аерозолів різко знижується: вона дещо зменшується порівняно з концентраціями аерозолів у поверхні на висоті 2 км, а потім ще на висоті приблизно 5 км. Але це знову ж таки "в середньому" в реальних ситуаціях картина може бути зовсім іншою і навіть спостерігається зростання концентрації з висотою; такі

зоні зростання називаються *аерозольними шарами*. Найбільш відомий і стабільний аерозольний шар – шар Юнге в стратосфері на висотах 17–22 км.

Важливу роль в утворенні аерозолів відіграють виверження вулканів, лісові пожежі, біологічні процеси, антропогенна діяльність людини тощо. При цьому основними газами, що сприяють утворенню аерозолів, є SO_2, H_2S і NH_3. Після потужних вулканічних вивержень кількість аерозольних частинок у стратосфері збільшується у багато разів, що спричиняє зміну її оптичних характеристик. Ці зміни в стратосфері зберігаються протягом 1–2 років після виверження [106].

Оскільки аерозольні частинки мають різні розміри (полідисперсність), то, на відміну від газів, однієї сумарної концентрації для опису їх кількості в атмосфері недостатньо, потрібно вказати концентрації частинок різних радіусів.

Для опису полідисперсності використовують функцію *n(r)* – функцію розподілу аерозольних частинок за розмірами:

$$n(r) = \frac{dN(r)}{dr},$$

де $N(r)$ – кількість частинок з радіусом, меншим за r.

Функція $n(r)$ має сенс відносно лічильної концентрації частинок різних радіусів, тобто показує, яких частинок з яким радіусом "багато", а з яким "мало". Повна концентрація всіх аерозольних частинок визначається виразом:

$$N = \int_0^\infty n(r)dr\,.$$

Щоб функція *n(r)* не залежала від загальної концентрації *N*, її нормують [106].

3.3. Поглинання електромагнітного випромінювання Сонця атмосферою Землі

Поглинання випромінювання – зменшення інтенсивності сонячного ЕМВ, що проходить крізь середовище (атмосферу) внаслідок його взаємодії з частинками середовища.

В реальних умовах цей процес пов’язаний із перетворенням частини ЕМВ, що надходить від частинок середовища в тепло, і наступним перевипромінюванням цієї енергії на більш довгих хвилях. Поглинання ЕМВ оцінюється коефіцієнтом поглинання.

Коефіцієнт поглинання випромінювання – це відношення величини поглиненого потоку енергії до величини падаючого потоку.

Поглинання зумовлене присутністю в атмосфері молекул, здатних поглинати енергію в різних зонах електромагнітного спектра. Це *поглинання є вибірковим і залежить від довжини хвилі випромінювання*. В деяких випадках

молекули суміші газів атмосфери, що поглинають сонячне ЕМВ, залишаються практично незмінними після взаємодії з ЕМВ, в інших випадках молекули змінюються, втрачаючи, наприклад, частину своїх атомів.

Найбільшу здатність до поглинання сонячного випромінювання володіють мають кисень, озон (O_3), пари води (H_2O) і вуглекислий газ (CO_2), метан (CH_4). Експериментально виявлені чітко окреслені, але різні за шириною і глибиною смуги поглинання (рис. 3.7) [85].

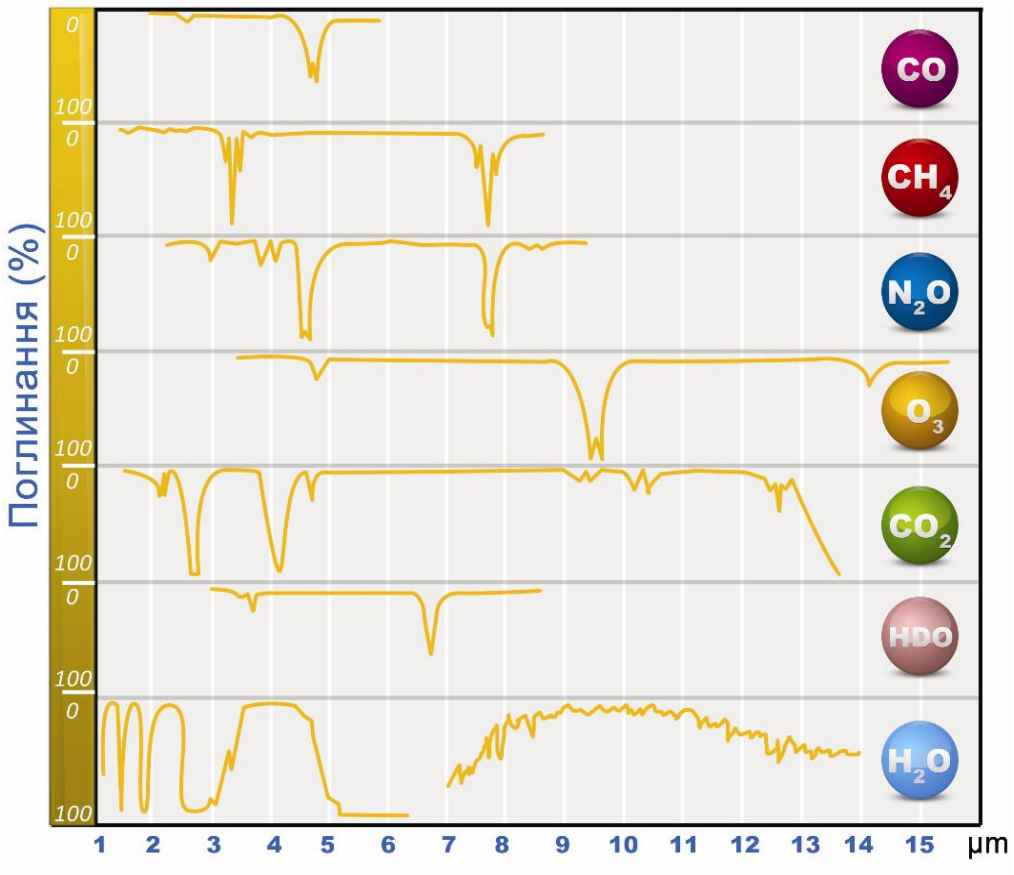


Рис. 3.7. *Спектральне поглинання сонячного випромінювання атмосферними газами*

Спектри поглинання атмосферних газів також мають багато вузьких смуг поглинання. Наприклад, на ділянці 7–14 мкм їх виявлено понад 400 [77].

Кисень. Молекули кисню вступають у взаємодію у верхніх шарах атмосфери, поглинаючи випромінювання в рентгенівському діапазоні спектра і короткохвильове (до 0,3 мкм) ультрафіолетове випромінювання.

Таке випромінювання є надзвичайно шкідливим для життя на планеті, оскільки може впливати на клітини живих організмів, викликаючи мутації й інші небажані явища. Молекули кисню в процесі поглинання розпадаються на окремі атоми кисню.

Цей процес відбувається в найвищих шарах атмосфери Землі, які при цьому збагачуються активними атомами кисню. В більш низьких шарах атмосфери, до яких жорстке короткохвильове випромінювання доходить вже доволі ослабленим,

окремі атоми кисню можуть об'єднуватися з молекулами кисню і формувати таким чином молекули озону.

Озон поглинає ЕМВ в середній частині ультрафіолетового діапазону спектра, захищаючи від того шкідливого випромінювання, яке залишилося не поглиненим молекулами кисню в більш високих шарах атмосфери. Після поглинання випромінювання молекула озону розпадається на атом кисню і молекулу кисню, але атом кисню зазвичай повторно поєднується з іншою молекулою кисню, створюючи при цьому нову молекулу озону. Відносно недавно (1985 р.) за допомогою ДЗЗ були виявлені різкі зменшення концентрації озону, так звані "*озонові діри*" (рис. 3.8).

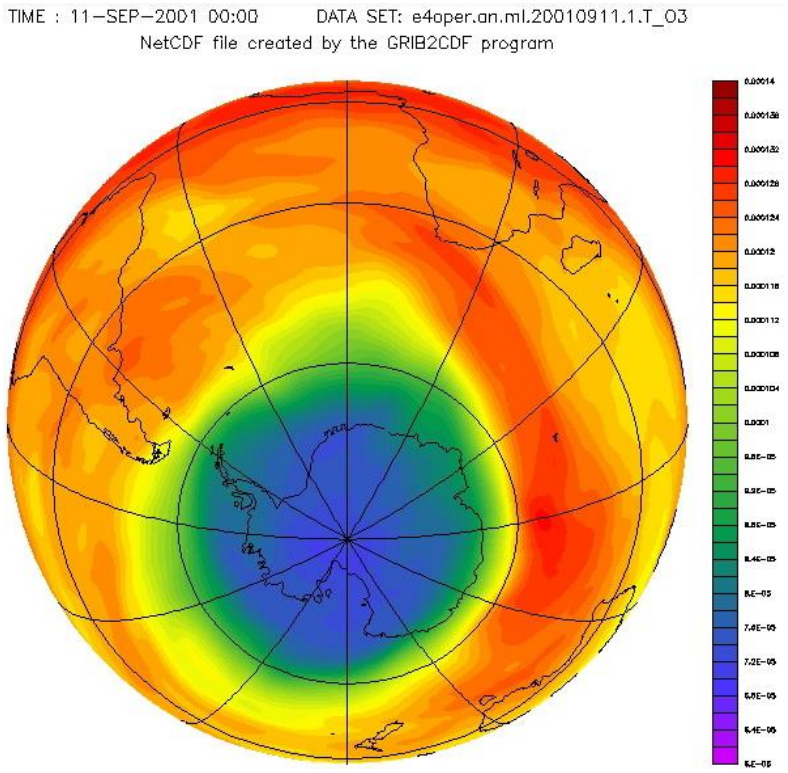


Рис. 3.8. *Руйнування озонового шару*

Озонова діра – локальний спад концентрації озону в стратосфері на 10–40 %.

Оскільки озон також поглинає достатньо шкідливу для живих істот частину ЕМВ, зменшення концентрації озону привернуло увагу світової спільноти. Було створено низку спеціальних датчиків ДЗЗ для озонових вимірів і організоване постійне спостереження за змінами концентрації атмосферного озону.

Вуглекислий газ виступає одним із парникових компонентів. Парникові гази пропускають ЕМВ видимої зони спектра, але інтенсивно поглинають випромінювання в ІЧ діапазоні, що, по-перше, приводить до певного підвищення температури атмосфери, а по-друге, до повернення частини поглиненого вуглекислим газом випромінювання назад до поверхні Землі. Збільшення концентрації вуглекислого газу розглядається як можлива причина глобального потепління.

Водяна пара – атмосферний газ, який сильно поглинає випромінювання в ІЧ електромагнітного спектра (λ = 1–22 мкм). Найбільш висока концентрація водяної пари спостерігається в нижніх шарах атмосфери, причому ця концентрація сильно змінюється від однієї географічної зони до іншої і від однієї пори року до іншої. Наприклад, повітряна маса над пустелею містить дуже малу кількість водяної пари, в той час як у тропіках спостерігаються достатньо високі його концентрації.

Таким чином, при проходженні крізь атмосферу ЕМХ взаємодіють з газами й аерозолями. При цьому процеси розсіювання і поглинання енергії зменшують інтенсивність сонячної радіації на поверхні Землі. На рис. 3.9 схематично показано, як змінюється пропускна здатність атмосфери зі зміною довжини хвилі.

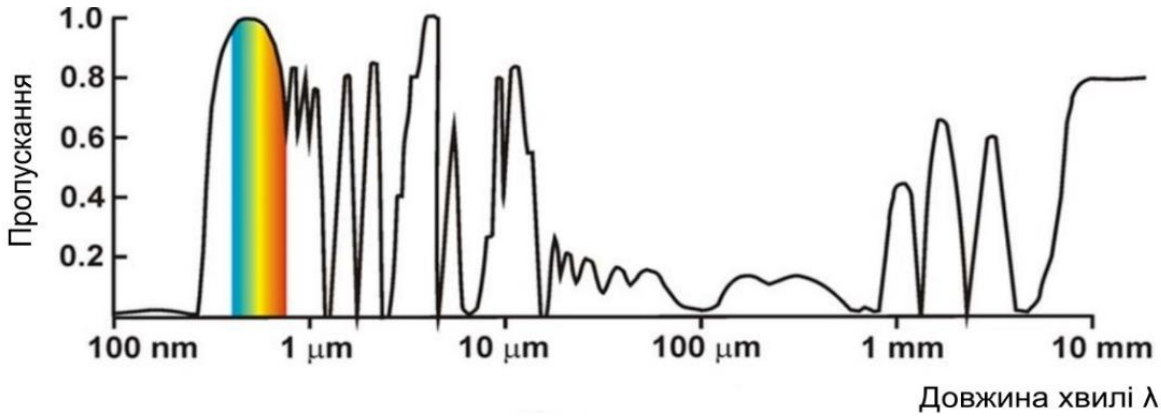


Рис. 3.9. *Пропускна здатність атмосфери: від ультрафіолетової до мікрохвильової зони спектра*

Поряд із загальним зменшенням інтенсивності ЕМВ крива, що описує енергію Сонця, що пройшло крізь атмосферу, має ряд локальних мінімумів – широких і вузьких смуг поглинання. Це смуги поглинання сонячної енергії атмосферним озоном, водяною парою, вуглекислим газом і киснем. Вищеперераховані атмосферні гази поглинають ЕМВ селективно, в певних діапазонах спектра, і це визначає, які саме діапазони електромагнітного спектра можна використовувати для цілей ДЗЗ, а які ні.

Коли пропускна здатність дорівнює нулю, це означає, що сонячне ЕМВ з такою довжиною ЕМХ не досягає поверхні Землі, тобто цілком поглинається атмосферою.

Кисень, озон, вуглекислий газ і водяна пара – чотири компоненти атмосфери, які головним чином спричиняють поглинання сонячного випромінювання. Поглинання залежить від довжини хвилі ЕМВ. На рис. 3.10 подано криву прозорості атмосфери в діапазоні λ = 0–22 мкм, з якого видно, що майже половина спектрального діапазону виявляється абсолютно непридатною з точки зору ДЗЗ, оскільки відповідне випромінювання не може пройти крізь атмосферу.

Атмосфера прозора для теплового випромінювання тільки в двох вузьких зонах (рис. 3.10) в інтервалі довжин хвиль 3,5–5,0 і 8–14 мкм, оскільки тільки в них може бути зареєстрований сканером потік емітерної енергії.

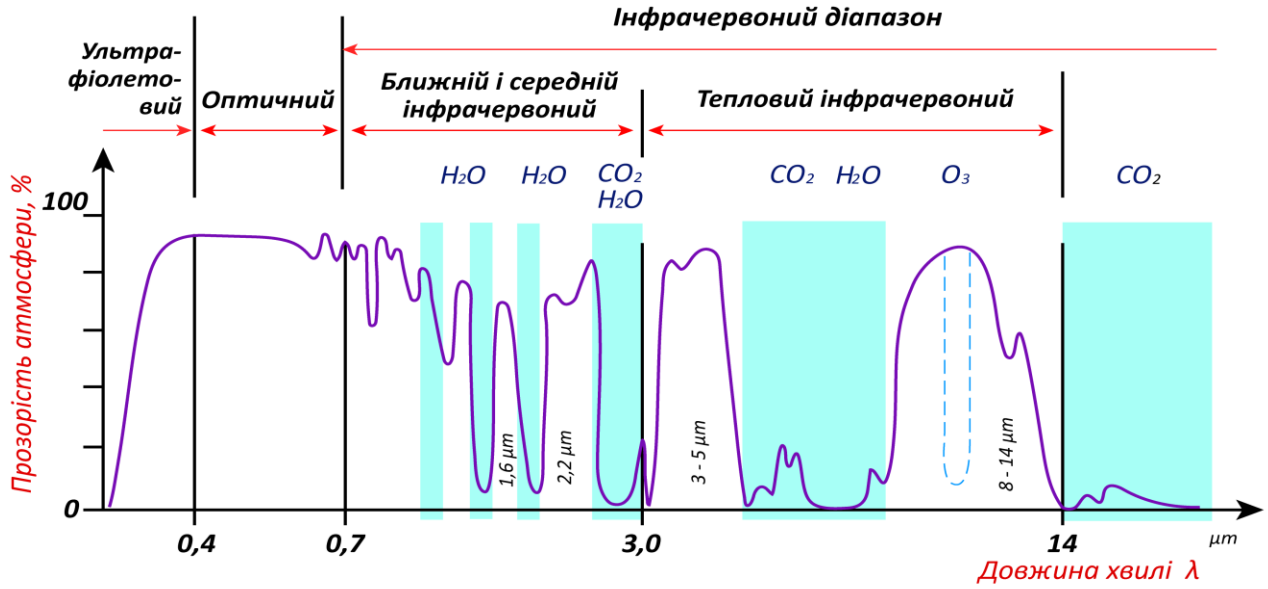


Рис. 3.10. *Крива прозорості атмосфери в діапазоні довжин хвиль від 0 до 22 мкм*

В атмосфері є ціла низка так званих *вікон прозорості*, в яких певні довжини хвиль проходять майже вільно. Заштриховані частини рис. 3.11 відображають зони непроникності або часткову прозорість для зазначених ЕМХ.

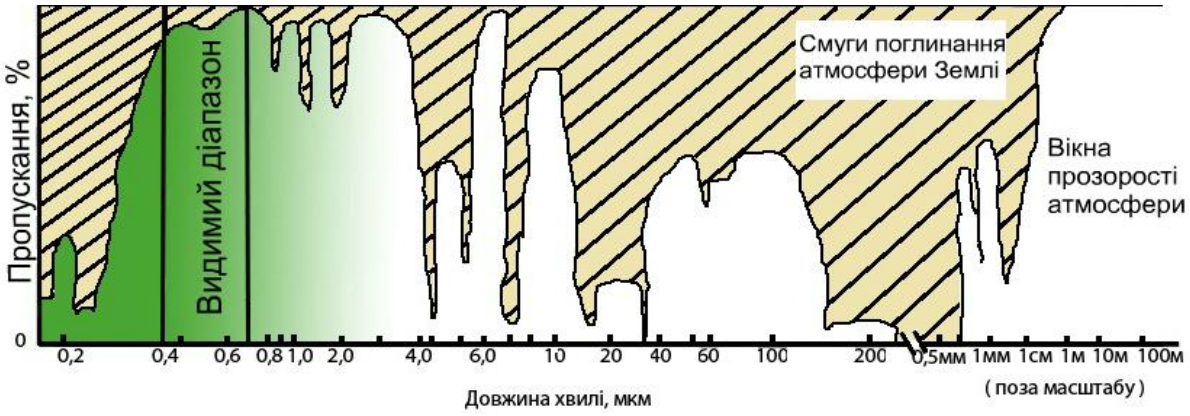


Рис. 3.11. *Зони пропускання і поглинання ЕМХ атмосферою*

Решта теплового випромінювання Землі поглинається водяною парою, озоном, вуглекислим газом і метаном. Хвилі інших довжин ІЧ діапазону не досягають апаратури, що встановлена на борту літака або супутника, і не можуть бути зареєстровані.

ЕМХ завдовжки менше $\lambda < 0{,}27$ мкм повністю поглинаються озоном. Вони не проходять крізь атмосферу і не можуть бути використані для ДЗЗ.

Більш довгохвильове випромінювання (в світловому діапазоні 0,4–5,5 мкм) проходить крізь атмосферу, і якщо розсіювання та поглинання енергії в ній не дуже великі, то випромінювання відбивається від поверхні Землі і може бути зареєстроване сенсорними системами (датчиками, приймачами) на борту носія – літака або супутника.

При збільшені довжини хвилі ЕМВ вплив атмосфери зменшується, і вона стає практично прозорою для хвиль мікрохвильового діапазону. Цей чинник використовується для радарних методів зондування, що працюють з хвилями сантиметрової і дециметрової довжини.

Взагалі, атмосфера Землі поглинає 15–20 % ЕМВ, що надходить від Сонця. Зрозуміло, що безглуздо намагатися вимірювати ЕМВ, відбите від поверхні Землі або випромінюване земною поверхнею, в тих діапазонах спектра, де поглинання атмосферними газами є значним: занадто малим буде корисний сигнал і занадто великими перешкоди.

У ДЗЗ використовують ті діапазони електромагнітного спектра, де поглинання ЕМХ атмосферними газами є незначним. Такі ділянки називають "*вікнами прозорості*" (рис. 3.12).

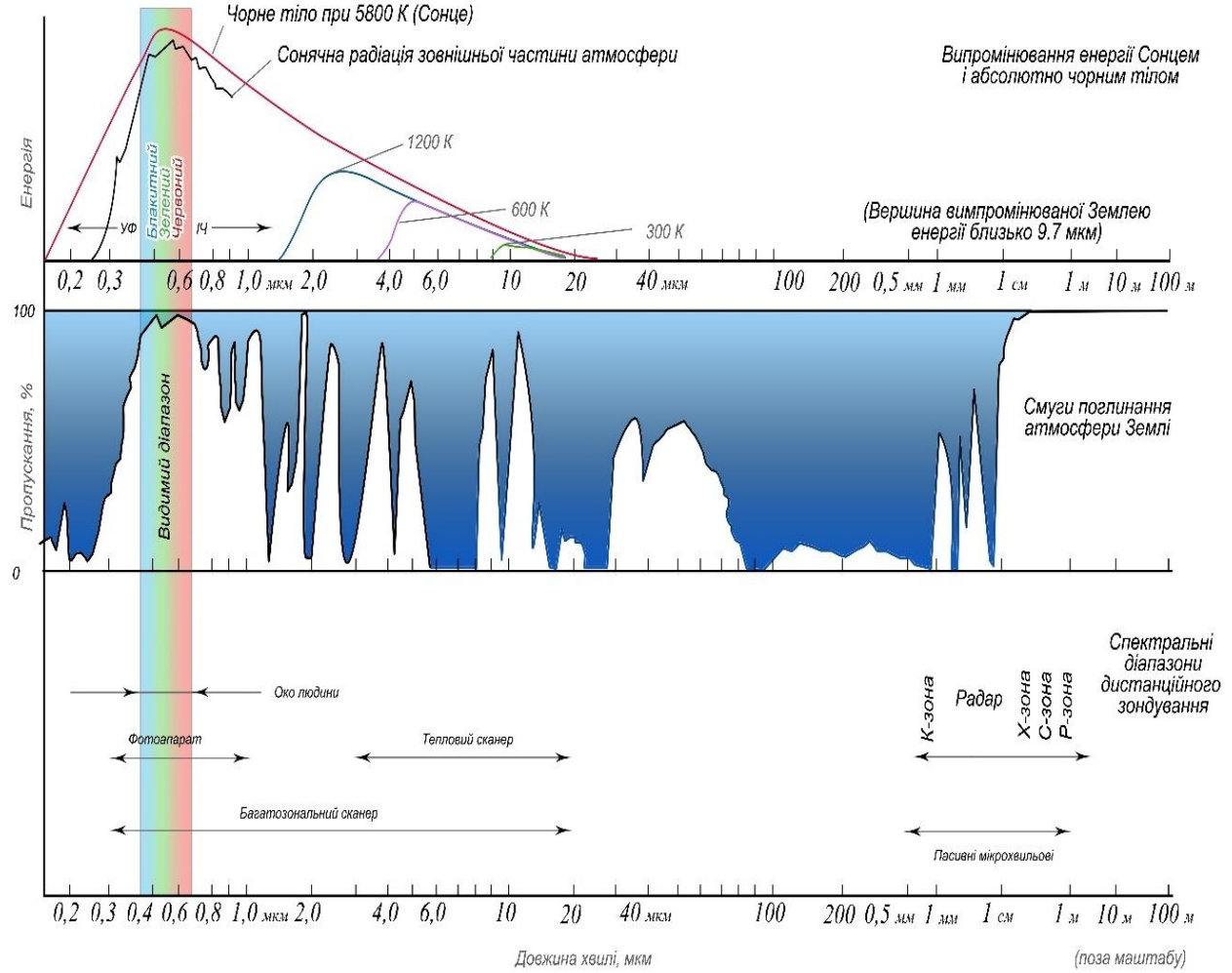


Рис. 3.12. *Спектральні діапазони, що використовуються в ДЗЗ*

Більшість інструментів ДЗЗ вимірюють ЕМВ в одному або декількох вікнах прозорості. Але це відноситься до приладів, орієнтованих на дослідження поверхні Землі. Прилади, що застосовуються на метеорологічних супутниках, вимірюють поглинання газів, наприклад, озону. Такі прилади, навпаки, налаштовують на ті довжини хвиль, де поглинання досліджуваних газів є максимальним.

3.4. Розсіювання електромагнітного випромінювання Сонця атмосферою Землі

Атмосфера Землі є *неоднорідним середовищем*, де перебувають молекули газу й аерозольні частинки (від тонкого аерозоля до щільних хмар з усіма можливими проміжними стадіями), краплинки води і частинки льоду, дрібні частинки пилу і диму тощо. Оптично неоднорідним середовищем є також і чисте, вільне від домішок повітря, оскільки в ньому внаслідок теплового руху молекул постійно виникають згущення та розрідження, тобто відбуваються коливання густини. ЕМХ, зустрівши ці неоднорідності на своєму шляху, взаємодіють з ними, зазнаючи трансформацій. По-перше, відбувається *поглинання* водяною парою, озоном, вуглекислим газом і метаном. По-друге, відбуваються *розсіювання* і *відбиття* ЕМХ.

Розсіювання – часткове перетворення ЕМВ, яке має визначений напрям поширення, на випромінювання, що поширюється по усіх напрямках.

Розсіяне в атмосфері світло при значній його товщі створює ефект світіння повітря, який називають *атмосферним серпанком*.

Густина атмосферного серпанку залежить від фізико-географічних і кліматичних особливостей земної кулі, сезонних і метеорологічних змін, часу доби тощо. Так, атмосфера більш прозора над поверхнею морів і океанів, на відміну від степових і пустельних районів, де в повітрі міститься багато дрібного пилу.

Механічні дрібні частки й водяна пара в атмосфері, утворюючи атмосферний серпанок, знижують контрастність зображення на знімках.

Отже, зустрічаючись із молекулами і домішками в атмосфері, сонячні промені, що несуть сонячну енергію, втрачають прямолінійний напрям свого поширення і розсіюються (рис. 3.13).

ЕМВ від розсіюючих частинок і субстанцій поширюється так, наче вони самі є джерелом ЕМВ.

Атмосферне розсіювання світла зменшує пряму сонячну радіацію і підвищує розсіяне, дифузійне, випромінювання атмосфери.

Інтенсивність розсіювання ЕМВ залежить від декількох чинників:

– співвідношення між довжиною хвилі випромінювання і розміром частинки, з якою вона стикається;

– відстані між частинками, що розсіюють енергію ЕМВ;

– кількості об’єктів, що розсіюють енергію ЕМВ на шляху випромінювання;

– довжини шляху, який ЕМХ проходить в атмосфері.

При цьому процеси розсіювання і поглинання енергії зменшують інтенсивність сонячної радіації на поверхні Землі та змінюють діапазон випромінювання. Це стає очевидним, якщо порівняти спектри випромінювання, виміряні зовні атмосфери і біля поверхні Землі.

Близько 25 % загального потоку сонячного ЕМВ перетворюється в атмосфері на розсіяне ЕМВ. Значна частка (2/3) розсіяного ЕМВ доходить до земної поверхні. Але це вже дещо інший вид ЕМВ, відмінний від прямого ЕМВ.

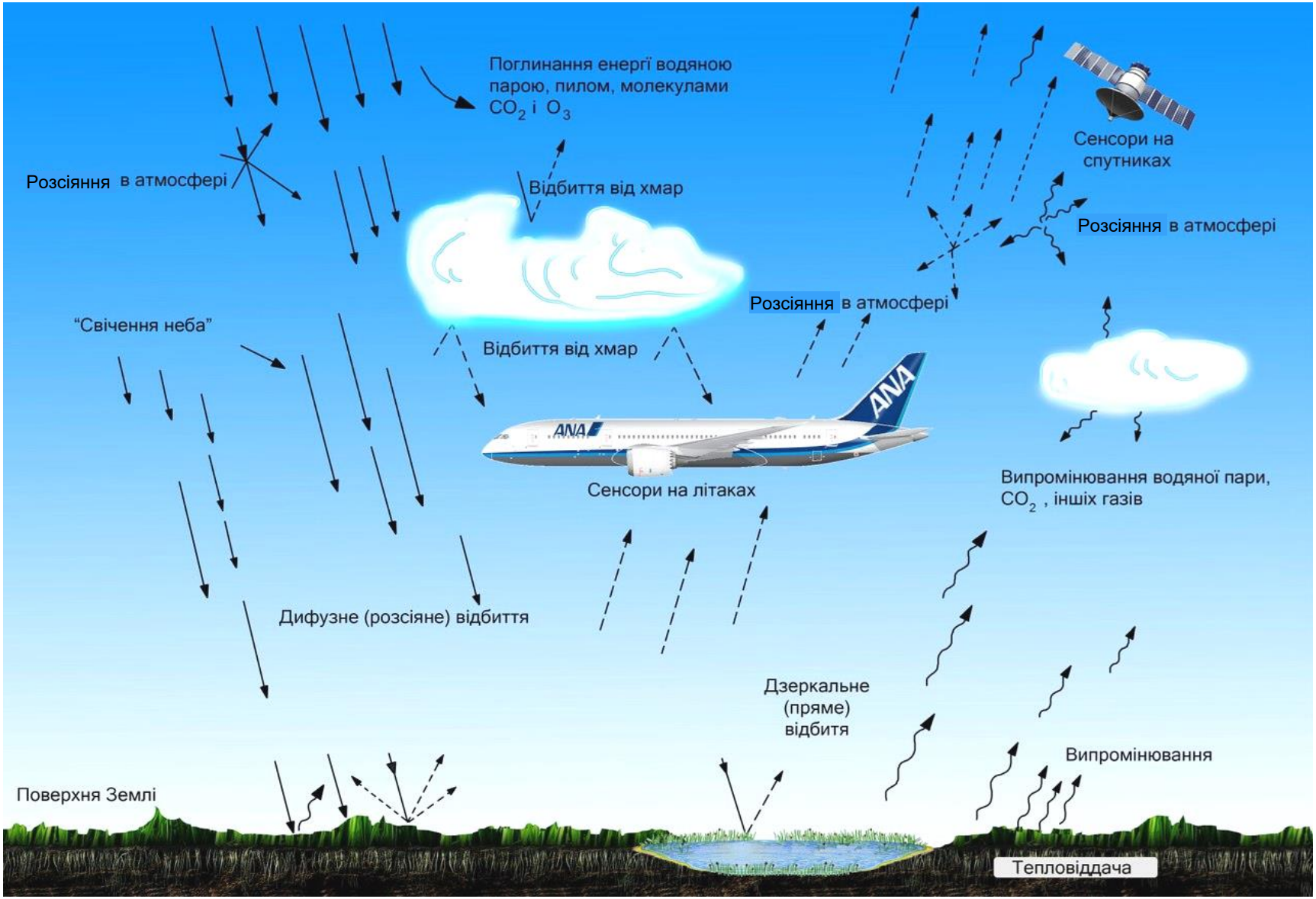


Рис. 3.13. *Взаємодія електромагнітного випромінювання з атмосферою й об'єктами на поверхні Землі*

По-перше, розсіяне ЕМВ надходить до земної поверхні не від сонячного диску, а від усього небосхилу. По-друге, розсіяне ЕМВ відмінне від прямого за спектральним складом. Річ у тім, що промені різної довжини хвиль розсіюються по-різному.

Співвідношення енергії випромінювання різних довжин хвиль у розсіяній ЕМВ зміщується в зону коротких хвиль. При цьому чим менші розміри розсіюючих частинок, тим сильніше розсіюється короткохвильове випромінювання порівняно з довгохвильовим.

У зоні видимого світла ЕМВ частка розсіяного ЕМВ при реєстрації сенсором складає від 100 % при суцільній хмарності до 5 % при абсолютно ясному небі.

При цьому виділяють три типи розсіювання в атмосфері: розсіювання Релея (молекулярне розсіювання), розсіювання Мі (аерозольне розсіювання) і неселективне розсіювання.

Розсіювання Релея (англ. *Rayleigh scattering*) являє собою ефект, лінійний по полю і який спостерігається при розсіюванні світла на неоднорідностях менших довжини хвилі випромінювання. При розсіюванні світла на частинках, розміри яких зіставні з довжиною хвилі випромінювання, спостерігається розсіювання, яке вперше було кількісно описане Мі.

3.4.1. Розсіювання за законом Релея (молекулярне розсіювання)

Однорідна речовина не повинна розсіювати світло. Але через флуктуації густини навіть найчистіші речовини розсіють світло.

Джон Вільям Стретт, лорд Релей III у праці "Про світло від неба, його поляризації і кольори", яка була опублікована у 1899 р., довів, що під час розсіювання світла в неоднорідному середовищі на частинках, менших за розміром, ніж 0,1 λ, інтенсивність розсіяного світла обернено пропорційна четвертому ступеню довжини хвилі (закон Релея):

$$I_{розс} = \frac{CI}{\lambda^4},$$

де $I_{розс}$ – інтенсивність розсіяного ЕМВ;

C – коефіцієнт, який залежить від фізичної природи газу та його концентрації в одиниці об’єму повітря;

I – інтенсивність прямої сонячної радіації;

λ – довжина хвилі сонячного випромінювання.

Розсіювання Релея – розсіювання світла без зміни довжини хвилі (*пружне розсіювання*) на частинках, *неоднорідностях* або інших об’єктах має місце, коли діаметри молекул і найдрібніших частинок, що взаємодіють з ЕМВ в атмосфері, значно менші від довжини хвилі ЕМВ ($r << \lambda$). Оскільки флуктуації (випадкові відхилення) густини зумовлені молекулярно-кінетичною природою будови речовини, то розсіювання від флуктуацій отримало назву *молекулярного*. Прикладами таких об’єктів можуть слугувати частки пилу, молекули азоту (N_2) і кисню (O_2).

Якщо розміри неоднорідності значно перевищують довжину хвилі ЕМВ, то виникає *неселективне розсіювання:*

$$I_{розс} = \frac{const}{\lambda^2}.$$

У результаті розсіяння світла по всіх напрямках (рис. 3.14) інтенсивність світла в напрямку поширення зменшується швидше, ніж у разі лише поглинання.

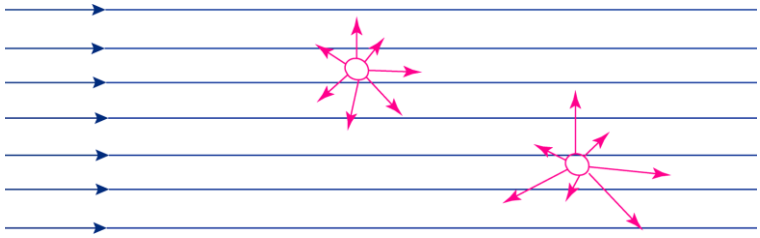


Рис. 3.14. *Розсіювання Релея*

Зменшення інтенсивності в цьому разі описується такими формулами:

$$I = I_0 e^{\mu L},$$

$$I = I_0 10 \cdot e^{\mu' L},$$

де $\mu = k + æ$ – коефіцієнт ослаблення;

$\mu' = 0{,}43\mu$;

k – коефіцієнт розсіяння;

$æ$ – коефіцієнт поглинання, поділений на одиницю довжини шляху в речовині.

Інтенсивність розсіяного світла в різних напрямах (у наближенні Релея) можна визначити за формулою:

$$I_\alpha = I_{\frac{\pi}{2}} (1 + \cos^2 \alpha).$$

Світло, розсіяне під кутом $\alpha = \pi/2$ до напрямку випромінювання, що падає на речовину, виявляється *поляризованим*, а за інтенсивністю – вдвічі меншим від розсіяного під кутами $\alpha = 0$ і $\alpha = \pi$.

Методи вимірювання параметрів (інтенсивності, ступеня поляризації) розсіяного світла з метою отримання інформації про концентрацію, розміри частинок і макромолекул у розчинах та характер міжмолекулярної взаємодії називаються *нефелометрією*, а самі пристрої – *нефелометрами*.

Розсіювання Релея широко використовується для детектування наявності домішок та конденсатів у газах, зокрема в експериментальній фізиці. У зв'язку з розвитком лазерів з'явився специфічний "термін лазерне релеєвське розсіювання".

За відсутності розсіювання вдень небо було б чорним, оскільки потужна товща земної атмосфери прозора і безбарвна. Але чому ж в ясний день небо блакитного кольору?

Звичайне для нас небо (атмосфера) складається з молекул суміші газів, з твердих мікрочастинок пилу, диму, дрібних крапель води і кристалів льоду, частинок солі тощо.

При зіткненні з молекулами газу кожен з кольорів видимого діапазону випромінювання розсіюється. При цьому ЕМХ з більш довгими довжинами хвиль (червоні, жовті, помаранчеві) розсіюються менше, на відміну від хвиль з короткими довжинами (синя зона видимого спектра). Через це вдень, коли сонячні промені проходять крізь атмосферу найкоротшим шляхом (рис. 3.15), після повного розсіювання в повітрі залишається у вісім разів більше кольорів синього діапазону спектра, ніж червоного.

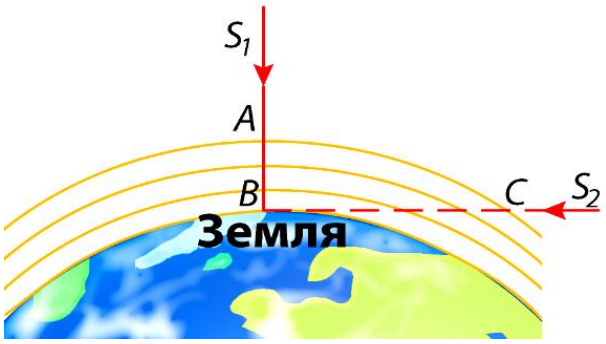


Рис. 3.15. *Порівняння довжини шляху сонячного променю при позиції Сонця в зеніті (S1) і на горизонті (S2) [110]*

Рис. 3.16. *Колірна гамма неба в ясний день*

Незважаючи на те, що найкоротшою хвилею зорового діапазону є фіолетова, небо здається блакитним через змішування фіолетових і зелених ЕМХ. Крім того, за однакової яскравості обох кольорів людські очі краще сприймають блакитний колір. Саме ці чинники і визначають колірну гамму неба: атмосфера начебто наповнена променями блакитно-синього кольору, оскільки короткохвильове блакитне випромінювання розсіюється значно сильніше, ніж випромінювання в діапазоні довших хвиль (рис. 3.16).

Білі хмари на блакитному небі утворюються через те, що вологе повітря, що містить невидиму пару, нагріваючись біля поверхні Землі, піднімається і розширюється, оскільки, що у верхніх шарах тиск повітря менший. Розширюючись, повітря охолоджується. При досягненні певної температури водяна пара конденсується навколо атмосферного пилу та інших зважених частинок, і як наслідок, утворюються крихітні краплинки води, злиття яких формує хмару.

Незважаючи на свій порівняно малий розмір, частинки води набагато перевершують розміри молекул газу. І якщо, зустрічаючи молекули повітря, сонячні промені розсіюються, то при зустрічі з крапельками води ЕМХ відбиваються від них. При цьому ЕМХ видимого діапазону (біле світло) свого кольору не змінюють і одночасно "фарбують" у білий колір молекули хмар.

Під час заходу Сонце наближається до горизонту і сонячний промінь спрямовується до поверхні Землі не вертикально, як удень, а під кутом (рис. 3.17).

А більш довгі ЕМХ червоно-жовтого кольору доходять до поверхні Землі, забарвлюючи небо і хмари в характерні для заходу Сонця червоні і жовті кольори (рис. 3.18).

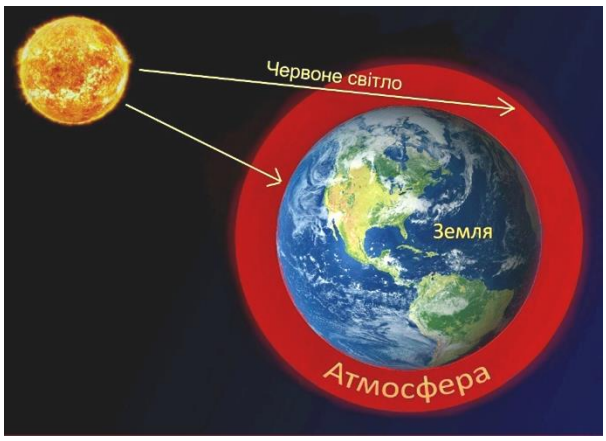


Рис. 3.17. *Спрямовування ЕМВ під час заходу Сонця*

Рис. 3.18. *Колір неба під час заходу Сонця*

Тому шлях, який проходить ЕМВ крізь атмосферу Землі, набагато перевершує той, який воно проходить удень, коли Сонце стоїть високо. Через це блакитно-сині хвилі поглинаються в товстому шарі атмосфери, не доходячи до Землі.

Примітка. Саме це і є причиною того, що для забезпечення видимості будь-якого об'єкта з великої відстані ліхтарям, що встановлюються на них надають червоного кольору.

Молекулярне розсіювання переважає у верхніх шарах тропосфери і стратосфери.

3.4.2. Розсіювання за законом Мі (аерозольне розсіювання)

Найбільш важливі дослідження в теорії розсіювання світла на великих частинках були виконані Г. Мі, В. В. Шулейкіним, К. С. Шифриним та ін.

Розсіювання за законом Мі (аерозольне розсіювання) – відбувається в тому разі, коли розміри розсіювальних компонент більші або дорівнюють довжинам хвиль сонячного випромінювання ($r \geq \lambda$). Це зазвичай частинки водяної пари і частинки пилу. Інтенсивність аерозольного розсіювання описується законом Мі:

$$I_{розс} = \frac{I\beta}{\lambda^{\varepsilon}},$$

де $I_{розс}$ – інтенсивність аерозольного розсіювання;

β – коефіцієнт пропорційності, що залежить від природної будови речовини, що розсіює;

ε $(0 < \varepsilon < 4)$ – число, яке залежить від розміру частинок, що розсіюються;

λ – довжина хвилі.

При аерозольному розсіюванні інтенсивність потоку, що поширюється від джерела розсіювання, залежатиме від розміру частинки. При збільшенні розміру

частинки збільшуватиметься частка енергії в потоці розсіяної радіації, спрямованої прямо за напрямком падіння променів.

Аерозольне розсіювання переважає в нижньому трикілометровому шарі тропосфери і виникає в декількох спектральних діапазонах: від ближнього ультрафіолетового до ближнього інфрачервоного.

У дистанційному зондуванні розсіювання Мі зазвичай проявляється як загальне погіршення багатоспектральних зображень у всьому інфрачервоному й світловому діапазонах за наявності в атмосфері густого туману.

3.4.3. Неселективне розсіювання

Неселективне розсіювання виникає у випадках, коли розмір частинок істотно перевищує довжину хвилі випромінювання.

Поряд з вищеописаними процесами селективного розсіювання в атмосфері ЕМХ певної довжини (або частоти) відбувається інше, більш повне розсіювання світла в димі, тумані й хмарах, якщо розмір часток на його шляху дещо перевищує довжину світлової хвилі.

Наприклад, водяні каплі з діаметрами 5–100 мкм однаково ефективно розсіюють усі хвилі видимого світла (0,4–0,7 мкм). Як наслідок, хмари і туман здаються білястими, оскільки суміш усіх кольорів приблизно в рівних кількостях дає білий колір [106].

В умовах суцільної хмарності ЕМВ в оптичному діапазоні не проникає крізь атмосферу.

Для забезпечення можливості отримання зображення прийнятної якості потрібно застосовувати системи відповідних фільтрів на приймачах дистанційного зондування, щоб виключити або звести до мінімуму ефекти розсіювання.

Інтенсивність розсіювання сонячного світла в близькому інфрачервоному діапазоні є незначною. При нормальній, ясній атмосфері розсіювання не має істотного впливу. Слабка задимленість приповерхнього шару атмосфери також не здійснює істотного впливу на випромінювання близького ІЧ діапазону, якщо розміри твердих часток диму не перевищують 1 мкм. Туман і хмари, навпаки, дуже сильно розсіюють ІЧ випромінювання в цьому інтервалі довжин хвиль (0,75–1,1 мкм), оскільки розміри водяних крапель мають розмір близько 4 мкм.

3.5. Вплив хмарності на дистанційне зондування

Важливою особливістю ДЗЗ є наявність між об’єктами зондування і реєструвальними приладами проміжного середовища, яке суттєво впливає на випромінювання: це товща атмосфери і хмарність.

При плануванні і здійсненні ДЗЗ потрібно враховувати просторово-часові закономірності поширення хмарності протягом доби і року. Варто пам’ятати, що на практиці отримати для досліджень потрібний знімок певної території у певну пору року – завдання досить складне, передусім через хмарність, яку недаремно називають ахіллесовою п’ятою космічного зондування в оптичному діапазоні. За

статистичними даними, в кожний момент часу хмарність закриває близько 60–65 % земної поверхні, іноді досягаючи позначки 75 %, хоча над кожною її точкою хмари зазвичай зберігаються не більше 5 діб. Навіть малопотужні хмари блокують все оптичне випромінювання.

Частка покриття хмарами Світового океану становить не менше 70 %.

У південній півкулі кількість хмарного покриву більше, ніж у північній, при цьому в обох півкулях, як над суходолом, так і над океаном, має місце річний хід з максимумом у літній час і мінімумом у зимовий. Найбільші відмінності між різними даними спостережень проявляються в регіонах з високими альбедо підстильної поверхні. В таких районах можуть бути застосовані тільки активні методи ДЗЗ, засновані на мікрохвильовому випромінюванні, оскільки лише радіохвилі завдовжки понад 2 см безперешкодно проходять крізь хмарний покрив. На поширення ЕМХ завдовжки понад 2 см не впливають ні хмари, ні туман, ні дощ[10].

Відбитий від поверхні Землі сигнал повертається й приймається антеною радара. За допомогою комп'ютера ці сигнали можуть бути перетворені на радіолокаційне зображення місцевості, дещо відмінне від звичайних аерофотознімків, але такі, що з великим ступенем точності передають рельєф місцевості, оскільки довгохвильові імпульси радарних систем практично без викривлень проходять крізь атмосферу.

Мова йде про радарні системи бокового огляду (РБО). Одна або дві антени радара посилають монохроматичні хвилі завдовжки 0,86–100 см в поперек напрямку польоту літака відповідно в один або два боки від напрямку польоту (рис. 3.19).

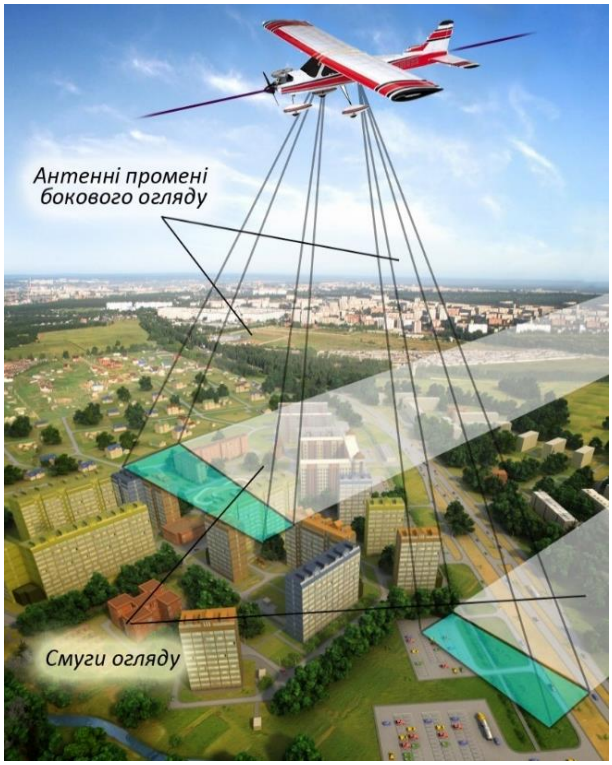


Рис. 3.19. *Схема бокового огляду за допомогою літакової РЛС*

[10] Варто зазначити, що на радіосигнали, що приймаються в цьому діапазоні, впливають різноманітні перешкоди, передусім штучного походження.

Інтенсивність розсіювання сонячного випромінювання також, як й інтенсивність його поглинання, зростає з довжиною шляху променя в атмосфері. Цим визначається освітленість поверхні Землі, яка залежить від положення Сонця відносно площі екватора і в першу чергу від висоти Сонця над горизонтом. Положення, або стояння, Сонця визначає спектр і інтенсивність потоку сонячної радіації, який відбивається і поглинається елементами ландшафту.

Слід також враховувати відмінності у локальній задимленості атмосфери. Значна імла спостерігається над промисловими і лісовими районами. Вона зростає під вечір. Задимленість атмосфери влітку більша, ніж взимку. Для послаблення негативного впливу повітряної імли при аерокосмічних зйомках застосовують світлофільтри, що відсікають фіолетові і сині промені.

Крім того, навіть пройшовши крізь безхмарну атмосферу, ЕМВ зазнає *рефракції* й *ослаблення*.

Атмосферна рефракція (заломлення променів) пов'язана зі зміною коефіцієнта заломлення в різних шарах атмосфери, що зумовлене їх різною щільністю, температурою, вологістю.

Рефракція світла в атмосфері – явище оптичного зміщення об'єктів, що спостерігаються крізь товщу атмосфери.

ЕМВ, проходячи з одного середовища в інше, реагують на зміну густини середовища, що проявляється у викривленні траєкторії променів, або рефракції. Мірою викривлення слугує індекс рефракції (індекс заломлення):

$$n = c / c_n .$$

Він є відношенням швидкості світла у вакуумі (c) до його швидкості у середовищі (c_n). Внаслідок рефракції атмосфери спостерігач бачить предмети не на напрямі їх дійсного положення, а в напрямі дотичної до променів у точці спостереження (рис. 3.20).

Вихідний промінь від світила S_2, проходячи земну атмосферу, переломлюється у кожному її шарі і викривляється, внаслідок чого спостерігачеві промінь здається начебто таким, що вийшов з точки S_2', що лежить вище. Світило S_1 вже зайшло за горизонт, але завдяки рефракції спостерігач ще бачить його.

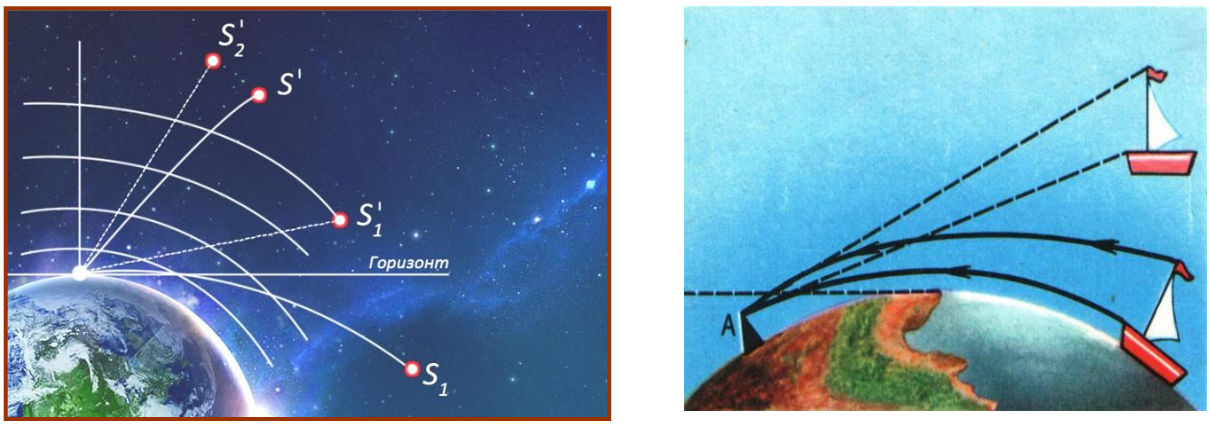


Рис. 3.20. *Приклад рефракції (заломлення променів)*

Розрізняють *астрономічну атмосферну рефракцію* – заломлення променів від небесних світил, внаслідок чого світила здаються розміщеними вище за їхнє дійсне положення на небі, та *наземну (геодезичну) рефракцію атмосфери* – заломлення променів, що поширюються від земних предметів або від предметів, розташованих в атмосфері.

Вплив рефракції – заломлення напрямку променів – становить декілька кутових секунд і повинно враховуватись при точних фотограмметричних вимірах знімків.

Успішне виконання космічного знімання земної поверхні залежить від правильного вибору так званих "вікон прозорості" атмосфери, тобто тих ділянок спектра, де ЕМВ майже не поглинається атмосферою.

Для пошуку родовищ корисних копалин у геології використовують такі спектральні діапазони зйомки: панхроматичний, 0,64 мкм, 0,68 мкм, 0,4–1,1 мкм, 1,55–1,67 мкм, 2,1–2,3 мкм, 10–12 мкм, мікрохвильовий.

Для визначення притоку вуглеводневих флюїдів (лат. fluidus – рідинний) найбільш доцільним є діапазон зйомки 2,27–2,46 мкм.

Зміни рослинності краще відображаються в діапазоні ЕМХ 0,6–0,9 мкм, а зв'язаність із змінами в гірських породах – в БІЧ (0,7–0,9 мкм) та СІЧ (1,6–1,7 мкм, 2,0–2,4 мкм) діапазонах. На супутникових знімках ґрунт яскравіший, ніж зелена рослинність у діапазоні 0,66–0,72 мкм, а зелена рослинність яскравіша за ґрунт у діапазоні 0,72–0,8 мкм. У СІЧ діапазоні вода має декілька смуг поглинання (1,4 мкм, 1,9 мкм і 2,7 мкм), в яких спектральний відгук поверхні Землі та рослинності послаблений [69].

Для вимірювання вологості і температури поверхні та шарів атмосфери в метеорологічних космічних апаратах використовуються ІЧ хвилі діапазону 3,0–5,0 мкм та 9,0–15,0 мкм, а для вимірювання вмісту вологості атмосфери – 6,0–8,0 мкм.

Для оперативної оцінки вологості поверхонь, льодової обстановки водних поверхонь та їх забруднень нафтопродуктами ефективним є використання всепогодної радіолокаційної зйомки в сантиметровому діапазоні спектра.

Питання для самоконтролю

1. *Як взаємодіє ЕМВ Сонця з атмосферою Землі?*
2. *Дайте характеристику атмосфери Землі.*
3. *Охарактеризуйте поглинання ЕМВ Сонця атмосферою Землі.*
4. *Охарактеризуйте розсіювання Релея.*
5. *Охарактеризуйте розсіювання Мі.*
6. *Охарактеризуйте неселективне розсіювання.*
7. *Поясніть вплив хмарності на дистанційне зондування.*

IV. ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СОНЦЯ З ПІДСТИЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

При проходженні ЕМХ крізь атмосферу Землі їх інтенсивність і спектральний поділ зазнають змін. Досягнувши поверхні Землі вони взаємодіють з об'єктами. Кожен об'єкт, речовина відбиває, поглинає, пропускає крізь себе і випромінює ЕМВ унікальним чином.

Відбиті або випромінені ЕМХ проходять зворотно крізь атмосферу і знову ж таки зазнають трансформацій перед тим, як потрапити до сенсора, де вони вимірюються і перетворюються на дані для наступного опрацювання.

Спосіб відбиття і/або поглинання об'єктом ЕМВ – це сигнал, який потрібно зареєструвати і перетворити на кількісну форму подання.

Відбите випромінювання характеризує відбивну здатність об'єкта, що подається значенням спектральної щільності енергетичної яскравості, яку й вимірюють сенсором. Отримані в результаті величини переводяться в дискретні цифрові значення, що відповідають характеристикам відбивної здатності.

4.1. Загальні відомості про взаємодію електромагнітного випромінювання з підстильною поверхнею

Поверхню планети в атмосферній оптиці прийнято називати *підстильною поверхнею*. Так називають земну поверхню, оскільки вона "підстилає" атмосферу і здійснює великий вплив на температуру, вологість й інші характеристики повітряної маси, що протікає або розташовується над нею.

Підстильна поверхня – сукупність природних і антропогенних ландшафтів (ґрунт, рослинність, вода, лід, сніг, населені пункти) на земній поверхні, що взаємодіють з нижнім шаром тропосфери в процесах тепло- та вологообміну [11].

Майже все тепло земна поверхня, як і атмосфера, одержує від Сонця. До інших джерел її нагріву належить тепло, що надходить з надр Землі, але воно незначне і становить лише частину відсотка від загальної кількості сонячного тепла.

Роль підстильної поверхні в ДЗЗ є дуже великою: у видимому діапазоні спектра поверхня відбиває і поглинає сонячне випромінювання. Причому для водної поверхні частина сонячного випромінювання проникає у водне середовище, і в цьому разі наявний перенос випромінювання в складній системі "атмосфера – водне середовище". В тепловому діапазоні спектра (ІЧ і МКВ діапазони) поверхні випромінюють електромагнітну енергію, а також відбивають ЕМВ, що падає на неї, – сонячне і низхідне власне випромінювання атмосфери. У довгохвильовому діапазоні спектра (радіохвилі) формування випромінювання відбувається не в тонкому шарі розділення двох середовищ, а в кінцевій товщі підстильної поверхні, і тут аналогічно водній поверхні має місце формування та розповсюдження випромінювання, щонайменше в системі двох середовищ.

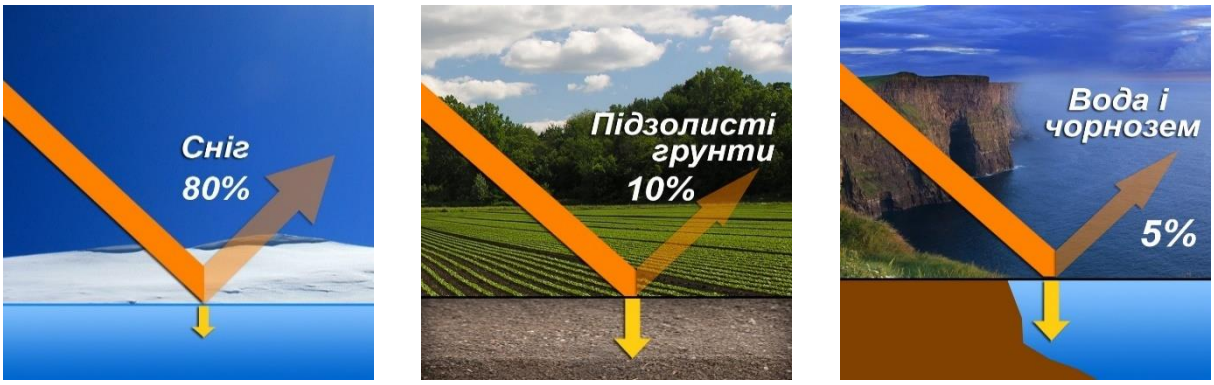
Підстильна поверхня відбиває, поглинає або пропускає ЕМВ. Кількість сонячного ЕМВ, яке відбивається, поглинається або пропускається об'єктом (речовиною) залежить від довжини хвилі і стану поверхні.

4.2. Альбедо

Відношення кількості відбитого від поверхні тіла ЕМВ до кількості ЕМВ, що надходить до поверхні тіла, називається *альбедо*. Вище альбедо означає більше відбиття та менше поглинання.

Альбедо (лат. *albedo* – білизна) **– *спроможність поверхонь або окремих тіл відбивати ЕМВ.***

Альбедо залежить від стану поверхні, її кольору, кута падіння променів на поверхню. Визначається у відсотках (%) відбитого ЕМВ від ЕМВ, що надходить до поверхні. Найбільше альбедо має сніг – 70–90 % (рис. 4.1, *а*), що сильно затримує його танення. Для піску альбедо становить 35 %, для трав'яного покриву – 20–25 %, для лісових крон – 5–20 %. Найменше альбедо у води – 5 % і ріллі (підзоли 10–20 % (рис. 4.1, *б*), чорноземи 5 % (рис. 4.1, *в*). Це найбільш теплоємні поверхні.



а) *б)* *в)*

Рис. 4.1. *Альбедо: а) снігу; б) підзолистих ґрунтів; в) води і чорнозему*

Альбедо водної поверхні залежить від того, під яким кутом на неї падають сонячні промені. Якщо кут падіння променів від 65º до 90º, сонячні промені проникають глибоко під воду і вона на 85–95 % поглинає їх. Якщо ж промені нахилені до поверхні під кутом до 30º та менше, вони відбиваються, як від дзеркала, і майже не поглинаються. Так, альбедо водної поверхні при висоті Сонця 90º дорівнює 2 %, а при висоті в 20º – 78–80 %.

Альбедо верхньої поверхні хмар в середньому становить 50–60 %.

Процес надходження й випромінювання сонячної енергії, нагрівання й охолодження всієї системи атмосфери Землі характеризується *тепловим балансом*.

Якщо прийняти річне надходження сонячної енергії на верхню межу атмосфери за 100 %, то баланс сонячної енергії виглядатиме так: відбивається від Землі й повертається назад у космічний простір – 42 % (ця величина характеризує *альбедо* Землі), причому 38 % відбивається атмосферою і 4 % – поверхнею Землі. Решта (58 %) поглинається: 14 % – атмосферою і 44 % – земною поверхнею (рис. 4.2).

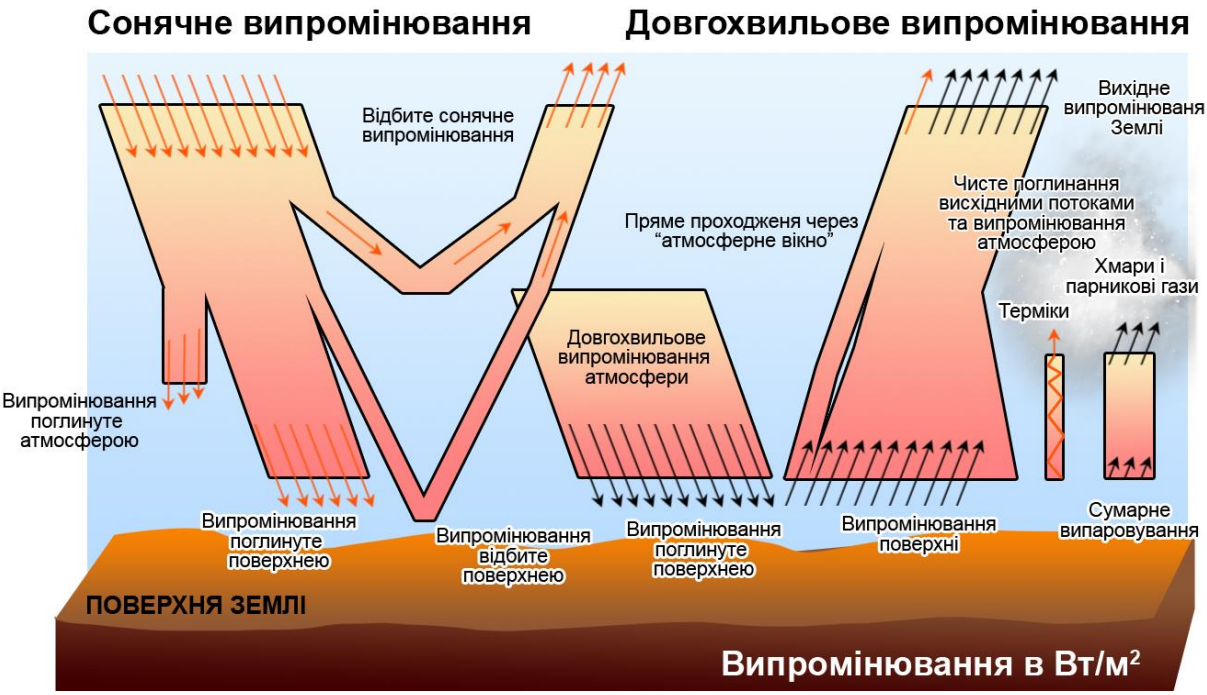


Рис. 4.2. *Процес надходження й випромінювання сонячної енергії*

Взаємодія ЕМВ з підстильною поверхнею проявляється в зміні напрямку, інтенсивності, поляризації ЕМХ, які й слугують тією інформацією, що надає можливість дистанційно оцінювати об'єкти на Землі.

Кожен об'єкт на Землі подається енергетичним полем, що несе інформацію про цей об'єкт.

Випромінювання, що надходить від Сонця або штучного джерела у вигляді пучків або променів ЕМХ (потоку енергії), вступає у взаємодію з речовиною або середовищем на поверхні Землі.

4.3. Типи взаємодії електромагнітного випромінювання Сонця з об'єктами на поверхні Землі

Розрізняють три основні типи взаємодії падаючого ЕМВ з об'єктами на поверхні Землі: *відбиття*, *поглинання* і *пропускання*.

Частина потоку ЕМВ відповідно до властивостей поверхні середовища або спрямовано *віддзеркалюється (відбивається)*, або *розсіюється*.

Їх відбивна здатність визначається молекулярною й атомною будовою речовини, властивостями поверхні середовища (шорсткістю, структурністю та орієнтуванням самої поверхні до напрямку падіння сонячних променів, тобто експозицією).

Якщо поверхня гладка (дзеркальна), то відбувається відбиття (кут падіння дорівнює куту віддзеркалення); якщо поверхня шорсткувата, то відбувається розсіювання в усіх напрямках. Інша частина ЕМВ проникає всередину підстильної поверхні і в ній *переломлюється* або *відбивається* на поверхнях розподілу речовин, що утворюють середовище (рис. 4.3).

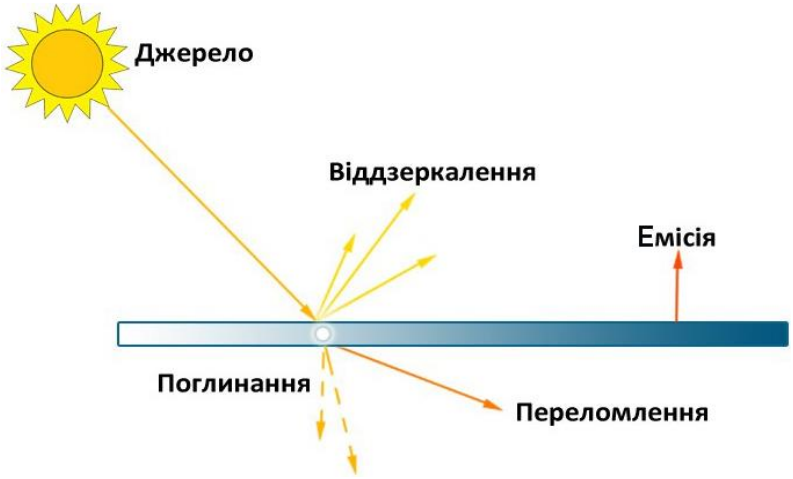


Рис. 4.3. *Взаємодія сонячного ЕМВ з підстильною поверхнею Землі*

ЕМВ F, що падає на поверхню, в загальному випадку поділяється на три частини:

$$F = F_\rho + F_\alpha + F_\tau.$$

Частину ЕМВ, відбитого від поверхні, називають *відбитим* F_ρ (рис. 4.4), частину ЕМВ, поглиненого поверхнею, – *поглиненим* F_α, а частину ЕМВ, що пройшла крізь поверхню, – *пропущеним* світловим потоком F_τ.

Сума відбитого, поглиненого і пропущеного світлових потоків, згідно з законом збереження енергії, дорівнює світловому потоку, що падає на поверхню.

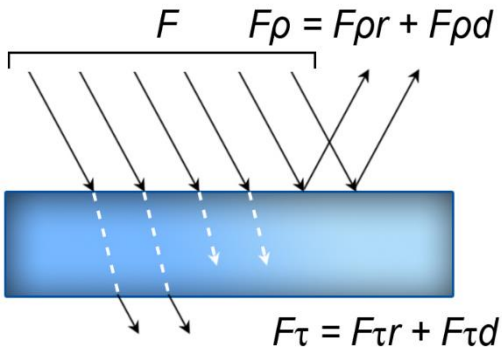


Рис. 4.4. *Взаємодія світлового потоку з поверхнею*

Розділимо праву і ліву частину рівняння на величину світлового потоку F і отримаємо вираз:

$$\rho + \alpha + \tau = 1,$$

де: $\rho = F_\rho/F$ *– коефіцієнт відбиття*, який визначає частину загального світлового потоку, відбитого від поверхні;

$\alpha = F_\alpha/F$ *– коефіцієнт поглинання*, який визначає частину загального світлового потоку поглиненого поверхнею;

$\tau = F_\tau/F$ *– коефіцієнт пропускання*, який визначає частину загального світлового потоку, що пройшов крізь поверхню.

У разі монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі λ коефіцієнти позначають $\rho(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$ і $\tau(\lambda)$.

Коефіцієнт відбиття ρ складається з двох коефіцієнтів: спрямованого (дзеркального) ρ_r і розсіяного (дифузійного) відбиття ρ_d:

$$\rho = \rho_r + \rho_d.$$

Коефіцієнт пропускання τ також складається з двох коефіцієнтів: спрямованого τ_r і розсіяного (дифузійного) пропускань τ_d:

$$\tau = \tau_r + \tau_d \, .$$

Для оцінки спектральних властивостей матеріалів спектральну залежність коефіцієнтів $\rho(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$ і $\tau(\lambda)$ зображують графічно в прямокутній системі координат, відкладаючи вздовж осі абсцис довжину хвилі λ (іноді з частковим включенням зон УФ та ІЧ випромінювання) (рис. 4.5), а вздовж осі ординат – один із спектральних каналів.

Якщо графік охоплює широкий діапазон довжин хвиль, то зручніше використовувати логарифмічний масштаб.

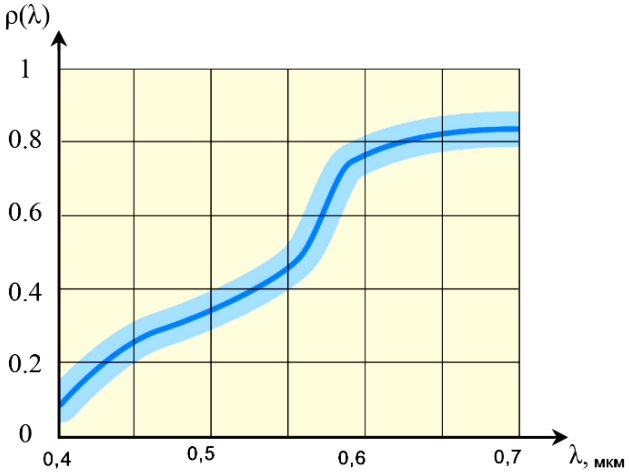


Рис. 4.5. *Приклад спектральної характеристики відбиття*

Примітка. Кожна поверхня є тільки геометричною межею, яка розділяє об’єми, зайняті різною речовиною (наприклад, повітря – скло, повітря – метал, повітря – дерево, вода – пісок).

Сама по собі геометрична поверхня не містить жодної речовини і не може здійснювати будь-який вплив на падаюче ЕМВ.

Будь-яке оптичне явище визначається властивостями речовини, що розташована біля межі розподілу, тобто біля поверхні об’єкта. В багатьох випадках товщина шару, який здійснює вплив на спостережуване явище, виявляється дуже малим і вимірюється одиницями або навіть частками довжини хвилі падаючого випромінювання. Тому багато оптичних явищ найчастіше відносять до поверхні, що зручно математично, хоча це неправильно. В термін "поверхня" потрібно вкладати не тільки геометричний, але й фізичний зміст, коли мова йде про поверхневий шар, товщина якого в різних випадках виявляється різною.

Тією чи іншою мірою ЕМХ взаємодіють з носіями зарядів у речовині (атомами або молекулами) і поглинаються ними. Тобто відбувається *абсорбція*. Нагрівання об'єкта (речовини, середовища), що виникає в результаті такого поглинання, викликає потік вторинного теплового випромінювання – *емісію*, довжина хвилі якої залежить від температури об'єкта (речовини, середовища). Наприклад, у результаті сонячного нагріву поверхня Землі випромінює інфрачервоні ЕМХ. Саме через це частину ІЧ спектра з довжинами ЕМХ більше 3 мкм називають *тепловим ІЧ піддіапазоном*.

Можливе також проникнення ЕМХ певної довжини всередину середовища на певну глибину від поверхні, ніби її просвічування, – *трансмісія* або *пропущення*.

4.4. Типи відбиття електромагнітного випромінювання Сонця підстильною поверхнею

Співвідношення, що пов'язує між собою компоненти ЕМВ з поверхнею, можна отримати з закону збереження енергії. Враховуючи, що усі компоненти є функціями довжини хвилі, запишемо це співвідношення у наступному вигляді:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda), \qquad (4.1)$$

де $E_I(\lambda)$ – енергія падаючого випромінювання;

$E_R(\lambda)$ – енергія відбитого випромінювання;

$E_A(\lambda)$ – поглинена енергія;

$E_T(\lambda)$ – енергія випромінювання, що пройшла крізь речовину.

Властивості відбитого, поглиненого і пропущеного ЕМВ змінюються для різних об'єктів на Землі і залежать від речовини, з якої складається об'єкт, та фізичних умов, у яких знаходиться об'єкт. Саме ці відмінності і дозволяють ідентифікувати об'єкти на знімку. Крім того, для об'єктів одного типу співвідношення між поглиненим, відбитим і пропущеним ЕМВ залежить від довжини хвилі. Як наслідок, об'єкт може бути нерозрізненим в одному спектральному діапазоні, але добре розрізнятись в іншому. У видимій частині спектра ці відмінності сприймаються як зміна кольору. Наприклад, об'єкти здаються синіми, якщо вони відбивають більшу частину ЕМВ синьої зони спектра, і зеленими, коли максимум відбивної здатності припадає на зелену зону спектрального діапазону. Те саме відноситься і до будь-якого іншого кольору (рис. 4.6).

Амплітудні варіації спектра відбитого випромінювання використовують для дешифрування різних об'єктів на знімку.

Основні процеси, що відбуваються при взаємодії сонячного ЕМВ з підстильною поверхнею, – це *поглинання* та *відбиття* ЕМХ.

Для напівпрозорих середовищ треба враховувати також, яка частина ЕМВ буде поглинена, яка розсіяна, а яка пропущена всередину середовища. Пропущене ЕМВ залежить від властивостей середовища і від довжини хвилі випромінювання. В рамках ДЗЗ нас цікавить головним чином відбите випромінювання, яке,

відбившись від поверхні, змінює напрямок руху від "вниз" на "вгору" і може бути виміряне супутниковими приладами.

Оскільки велика кількість систем ДЗЗ працює в тих спектральних діапазонах, де домінує відбите випромінювання, відбивні властивості різних об'єктів відіграють дуже важливу роль при їх ідентифікації.

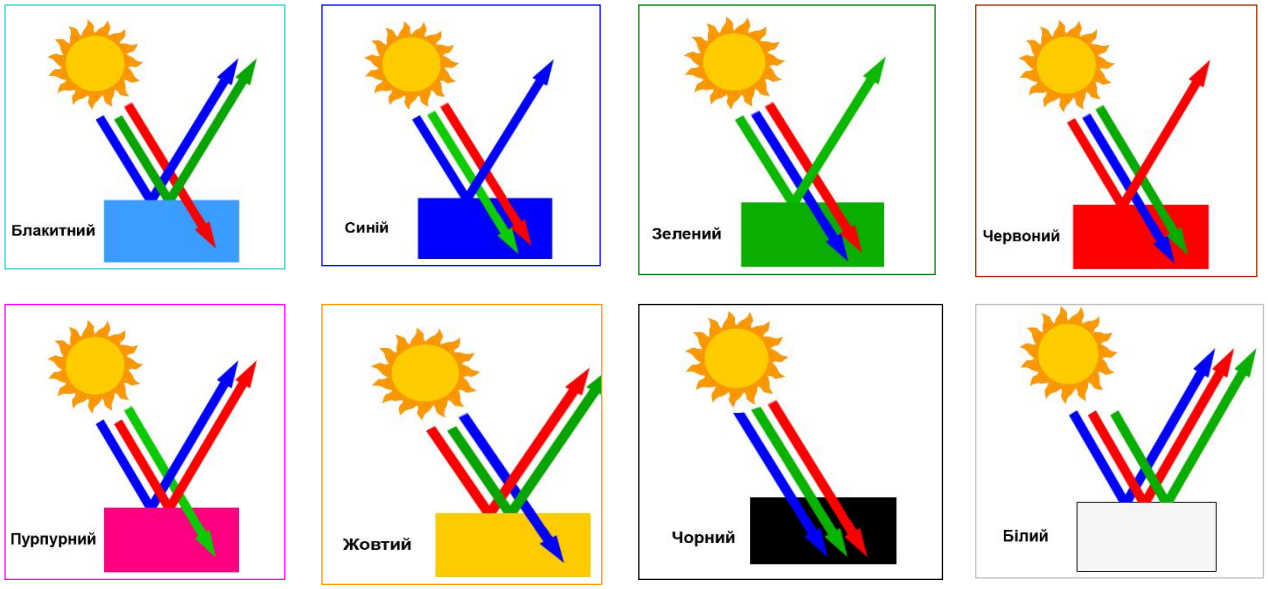


Рис. 4.6. *Залежність поглинання ЕМХ від довжини хвилі у видимому (оптичному) діапазоні*

У зв'язку з цим рівність (4.1) можна записати у вигляді:

$$E_R(\lambda) = E_I(\lambda) - [E_A(\lambda) + E_T(\lambda)]. \qquad (4.2)$$

Енергія відбитого випромінювання дорівнює енергії падаючого випромінювання віднімання або поглинанням енергії, або енергії пропущеного випромінювання.

Відбиттям називається повернення випромінювання об'єктом без зміни довжини його хвилі.

Структура підстильної поверхні визначає різні типи відбиття. Для вимірювання відбиття поверхонь використовується рефлектор Ламберта. Розрізняють направлене, або дзеркальне, віддзеркалення і дифузне, або розсіяне, віддзеркалення.

Найпростіший випадок відбиття спостерігається для ідеально гладкої поверхні, який найчастіше називається *дзеркальним* (рис. 4.7).

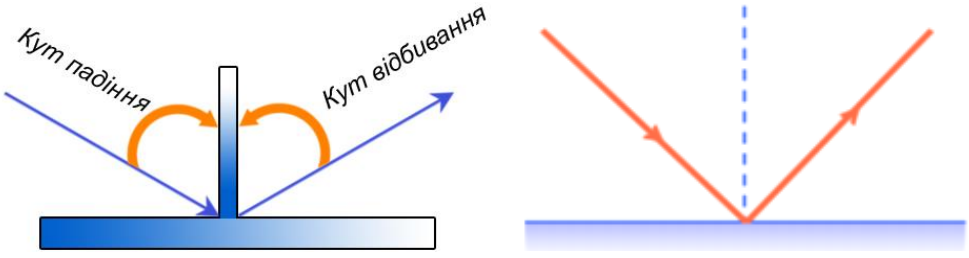


Рис. 4.7. *Ідеальний дзеркальний відбивач*

Такій моделі більш за все відповідає рівна поверхня води (без хвилювання) або льоду (без нерівностей). На її основі вводяться основні характеристики відбиття випромінювання.

Однак реальним поверхням завжди притаманні різні відхилення від плоскої поверхні, пов'язані з наявністю на них неоднорідностей. Всі реальні поверхні мають величезну кількість нерівностей: грудки землі і каміння на ґрунтах, брижі на воді тощо.

Якщо вплив неоднорідностей поверхні невеликий, то спостерігається другий тип відбиття – *квазідзеркальний* (рис. 4.8).

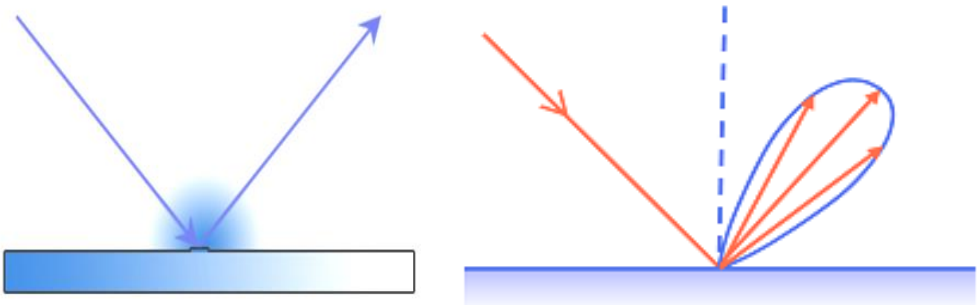


Рис. 4.8. *Квазідзеркальна поверхня відбиття*

Нехай на нерівну поверхню падає паралельний пучок променів. Тоді, відбиваючись від кожного малого елемента поверхні (який можна розглядати як плоский), за законами для плоскої поверхні, випромінювання від кожної нерівності і шорсткості буде відбиватись у різних (практично у всіх) напрямках. Такий тип відбиття називається *дифузним*.

Особливим випадком дифузного відбиття є такий, коли відбиття відбувається однаково в усіх напрямках; він називається *ортотропним (ламбертовим) вібиттям* (рис. 4.9).

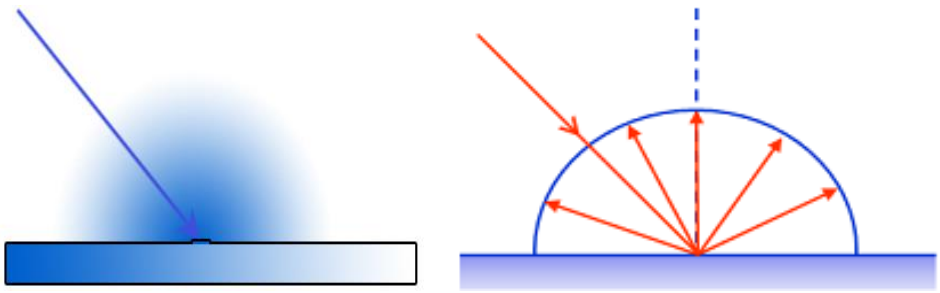


Рис. 4.9. *Ортотропна поверхня відбиття*

Як і у випадку дзеркального відбиття, здебільшого це є ідеалізація реального відбиття навіть для спеціально підготованих поверхонь. Однак ортотропне (ламбертове) відбиття зустрічається мало, проте часто використовується при моделюванні в теорії переносу випромінювання. Реальні поверхні не є ортотропними поверхнями, що відбивають випромінювання, тому часто вводять ще один тип відбиття – квазіортотропне відбиття (рис. 4.10).

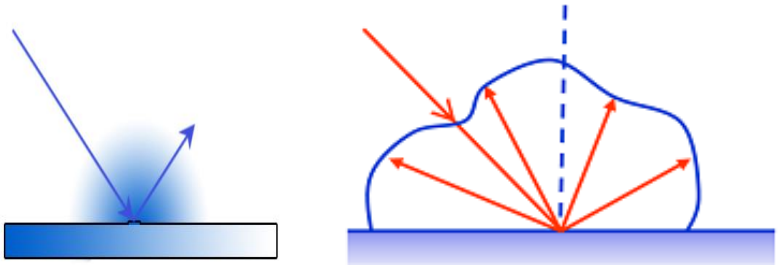


Рис. 4.10. *Квазіортотропна поверхня відбиття*

Крім цих, існує ще один тип дифузного відбиття – *зворотне*. Зворотне відбиття властиве багатьом природним поверхням. Для них максимум відбиття відбувається у напрямку, зворотному падаючому випромінюванню (рис. 4.11).

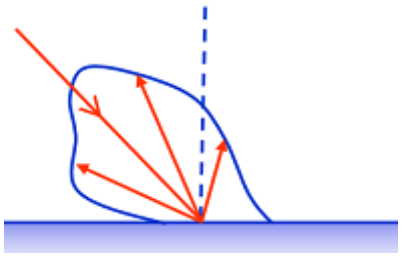


Рис. 4.11. *Поверхня зворотного відбиття*

Наявність тіней від нерівностей і шорсткості приводить до появи добового ходу, тобто залежності від висоти Сонця, різних оптичних характеристик підстильних поверхонь. Найбільш наближеним до ортотропної поверхні з малими розмірами шорсткості є сніжний покрив.

Категорія поверхні залежить від відношення розмірів її нерівностей до довжини хвилі падаючого випромінювання. Чи буде картина відбиття наближена до одного з описаних крайніх випадків, залежить від ступеня шорсткості поверхні і довжини хвилі випромінювання.

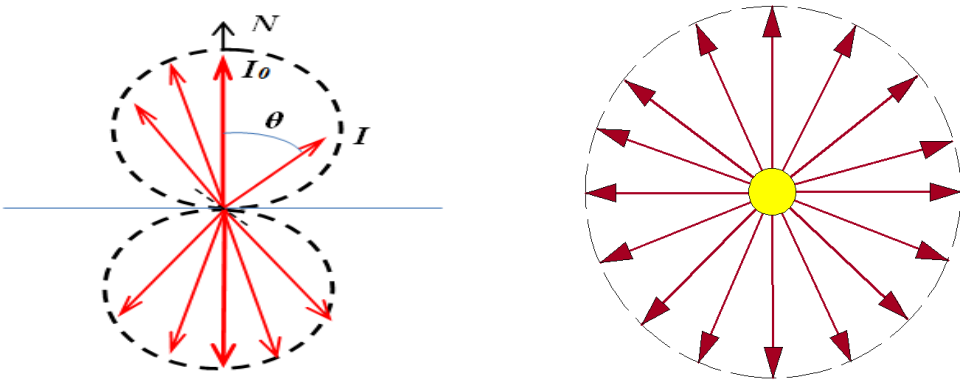
Якщо довжина хвилі набагато менша від масштабу шорсткості поверхні або розміру частинок, що утворюють поверхню, відбиття випромінювання на поверхні буде ближчим до дифузійного. Якщо ж поверхня є гладкою для випромінювання певної довжини хвилі, відбиття випромінювання буде відбуватись переважно в дзеркальному напрямку.

Направлене відбиття – це відбиття без розсіювання, наприклад, відбиття променя світла від деркала, яке може бути описано законами лінійної оптики. При повному дифузійному відбитті потужність або інтенсивність потоку відбитого випромінювання однакова в усіх напрямках, тобто індикатриса вектора потужності потоку рівновелика в усіх напрямках. Так, наприклад, у видимому діапазоні піщаний пляж є нерівною поверхнею, але у довгохвильовій частині електромагнітного спектра він поводить себе як плоска поверхня. Інакше кажучи, якщо довжина хвилі падаючого ЕМВ набагато менша від варіацій висоти поверхні або розмірів частинок, що її складають, то відбиття буде дифузним.

Потужність потоку – величина випромінювання, що проходить крізь елементарну площу.

Повне дифузійне відбиття, рівновелике в усіх напрямках, визначається, відповідно до закону Ламберта[11], як відбиття від абсолютно однорідної матової поверхні, величина відбиття якої прийнята за одиницю.

Випромінювач Ламберта – це такий випромінювач, у якого яскравість постійна і не залежить від напрямку (тобто не залежить від положення точки на поверхні і від кута спостереження) (рис. 4.12).



а) *б)*

Рис. 4.12. *Випромінювачі Ламберта:*
а – плоский випромінювач, б) сферичний випромінювач

Закон Ламберта (закон косинусів):

Плоска поверхня, що має однакову яскравість по всіх напрямках, випромінює світло, сила якого змінюється за законом косинуса:

$$I = I_0 \cos\theta,$$

де I_0 – сила світла в напрямку нормалі до поверхні;
θ – кут між розглядуваним напрямком і нормаллю.

Сила світла від сферичного джерела Ламберта постійна в усіх напрямках:

$$I = I_0 = const.$$

У природі розсіяне і дзеркальне відбиття відбуваються одночасно. Таке відбиття прийнято називати *змішаним,* або *комбінованим [5]*.

На відміну від дзеркального відбиття, спектр випромінювання, утворений при дифузному відбитті, містить інформацію про колір поверхні. Саме тому *вимір дифузних відбивних характеристик різних територій є важливою складовою ДЗЗ.*

4.5. Оптичні відбивні характеристики об’єктів

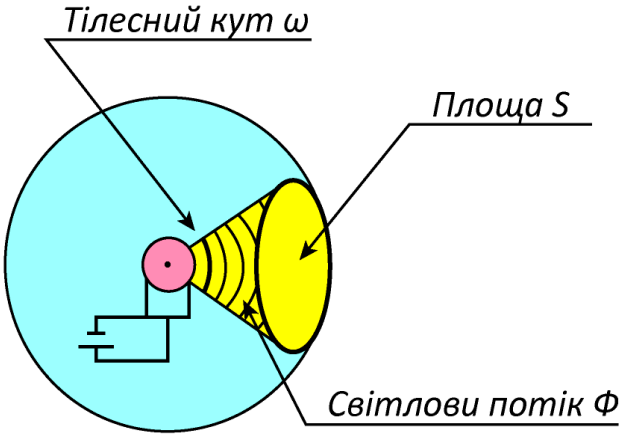
Як було з’ясовано попередньо, частки відбитого, поглиненого розсіяного і пропущеного променистих потоків оцінюються відповідними коефіцієнтами, які, за законом збереження енергії, в сумі завжди становлять одиницю.

При аеро- і супутникових зйомках найбільший інтерес викликають промені, відбиті від об’єктів земної поверхні.

[11] Згідно з цим законом, яскравість L поверхні, що розсіює світло, однакова на всіх напрямках.

У процесі ДЗЗ об’єкт місцевості подається енергетичним полем, що несе інформацію про цей об’єкт. Енергетичне випромінювання (яскравість) об’єкта знімальна система реєструє в певному кутовому інтервалі і з певної точки простору.

Графічну інтерпретацію світлотехнічних понять подано на рис. 4.13.



Тілесний кут	*ω = 1 ср (стередіан)*
Площа	*S = 1 м²*
Радіус	*r = 1 м*
Освітленість площини	*E = 1 лк (люкс)*
Сила світла	*I = 1 кд (кандела)*
Світловий потік	*Ф = 1 лм (люмен)*

Рис. 4.13. *Графічна інтерпретація світлотехнічних понять*

Для кількісних характеристик взаємодії випромінювання з об’єктами використовують абсолютні і відносні величини.

До кількісних показників відносяться світловий потік (*Ф*), сила світла (*I*), освітленість (*E*), яскравість (*B*).

Світловий потік (Ф) – потужність світлового випромінювання, що характеризує потік променистої енергії, який оцінюється за зоровим відчуттям:

$$\Phi = \int_{360}^{760} e_\lambda k(\lambda) d\lambda ,$$

де e_λ – енергія, що випромінюється на конкретній довжині хвилі;

λ – довжина хвилі;

$k(\lambda)$ – функція видимості.

Одиницею світлового потоку є люмен (лм), від латин. *lumen* – світло. Один люмен – світловий потік променистої енергії, що випромінюється точковим джерелом силою світла в 1 канделу (кд), а всередині кута – в 1 стерадіан (ср):

$$1 \text{ лн} = 1 \text{ кд·ср.}$$

Світловий потік від зоряного неба, що падає на сітківку ока, становить близько 0,000000001 лм, світловий потік від полуденного сонця – 8 лм. Саме тому людина не може дивитися на яскраве сонце неозброєним оком.

Сила світла або енергетична сила світла (I) – це величина, що визначається відношенням світлового потоку (Ф) до тілесного кута (ш), в межах якого світловий потік рівномірно розподіляється:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \left[\frac{Вт}{м^2} \right],$$

де Ω – тілесний кут, ср.

За одиницю сили світла прийнята *кандела* (кд) – сила світла точкового джерела, що випромінює світловий потік в 1 лм, який рівномірно розподіляється всередині тілесного кута в 1 стерадіан. Раніше ця одиниця виміру називалася ніт (1 нт = 1 кд/1м²), але на даний час стандартами в системі СІ застосування цього найменування не передбачено. Існують також інші одиниці виміру яскравості – стильб (сб), апостильб (АСБ), ламберт (Лб).

$$1\ АСБ = 1/\pi \times сб = 0{,}3199\ нт = Лб$$

Поверхнева щільність потоку енергії E_e – це величина потоку, що припадає на одиницю площі:

$$E_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial S}, \ \frac{Вт}{м^2} \ .$$

Якщо ділянка освітлюється потоком, то поверхнева щільність потоку енергії буде мати значення енергетичної освітленості. Якщо потік випромінюється ділянкою, то поверхнева щільність потоку енергії буде мати значення енергетичної яскравості.

Освітленістю називається відношення світлового потоку, що падає на деяку ділянку поверхні, до площі цієї поверхні.

За одиницю освітленості в міжнародній системі СІ беруть люкс.

Один люкс – це освітленість такої поверхні, на один метр якої падає світловий потік, що дорівнює одному люмену.

Освітленість позначається літерою Е. Для того щоб знайти освітленість, потрібно світловий потік поділити на площу поверхні:

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Для знаходження світлового потоку можна освітленість помножити на площу поверхні. Освітленість прямо пропорційна силі світла й обернено пропорційна квадрату відстані від джерела. Тому освітленість можна обчислити, поділивши силу світла на квадрат відстані від джерела світла до поверхні.

Яскравість (B) визначається як відношення сили світла, що випромінюється елементом поверхні в даному напрямку, до площі поверхні I, що світиться:

$$B = \frac{I}{S\cos\alpha}.$$

Якщо яскравість вимірюється у вузьких спектральних зонах, то їх називають *монохроматичною яскравістю.*

На яскравість впливає освітленість, яка складається з освітленості прямим сонячним світлом, розсіяним світлом небосхилу і світлом, відбитим від сусідніх об'єктів.

Абсолютна величина яскравості, яка визначається відбивними властивостями об'єкта, функціонально залежить ще й від відносного положення Сонця, знімальної системи і самого об'єкта, а також від нахилу відбивної поверхні, тобто від рельєфу місцевості (рис. 4.14) [72].

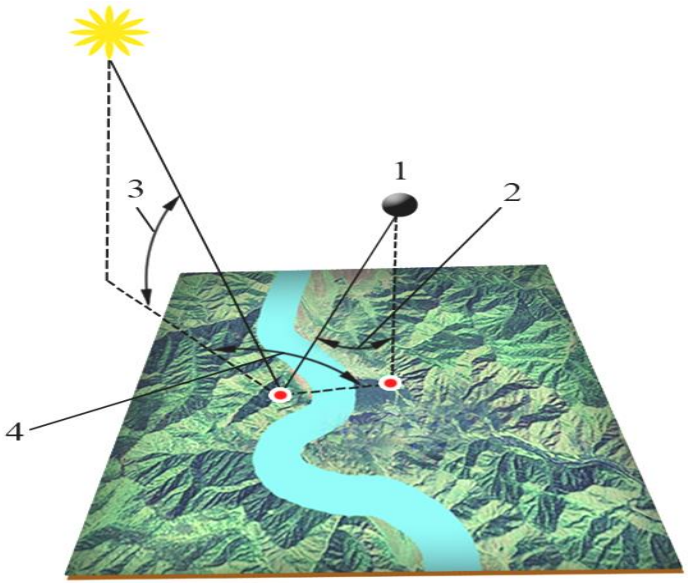


Рис. 4.14. *Геометрія освітлення і спостереження яскравості об'єктів земної поверхні: 1 – прилад реєстрації; 2 – кут візування; 3 – висота Сонця; 4 – азимут візування*

Тому схили на місцевості з однаковими відбивними властивостями, але різними кутами нахилу будуть мати різну яскравість і зобразяться на знімку різним тоном. Зміна випромінювання може відбуватись через безліч причин (добові і сезонні зміни стану природного або антропогенного об'єкта), які можна класифікувати на дві групи: перша – фактори, що визначають властивості самого об'єкта (фізичні, хімічні тощо), друга – зовнішні умови формування енергетичного поля, наприклад, умови освітленості об'єкта.

Саме тому повнота і достовірність інформації, отримуваної при дистанційному зондуванні підстильної поверхні, значною мірою залежать від правильного врахування властивостей енергетичного поля, що створюється об'єктом зйомки.

Зображення, що отримується в процесі ДЗЗ, є унікальним, оскільки спектральний склад, сумарна інтенсивність і направленість ЕМВ змінюються в часі.

Тому існує мала імовірність повторення сполучення умов, що визначають властивості енергетичного поля, а значить, малою є імовірність отримання іншого знімка з аналогічними розподілом полів яскравості (кольору).

Розрізняють *фотометричну яскравість* (англ. *luminance*) і *яскравість, яка сприймається оком людини* (англ. *luminous intensity*).

Найважливішими оптичними характеристиками земної поверхні виступають:
– інтегральна та спектральна яскравості;
– контраст яскравості;
– індикатриса відбиття (віддзеркалення);
– коефіцієнт спектральної яскравості (спектральний образ об'єкта).

4.5.1. Інтегральна яскравість

Інтегральна яскравість є найважливішою характеристикою оптичних властивостей об'єкта з позицій ДЗЗ. Вона визначає сумарну 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.

Освітленість у кожному пункті екрана (відбиваючої поверхні) є пропорційною інтенсивності світлової хвилі в цьому пункті. Інтенсивність світлової хвилі (L) прямо пропорційна косинусу кута між променем світла і вертикаллю, поставленою в пункті падіння променя, і обернено пропорційна квадрату віддалі до джерела світла (рис. 4.15):

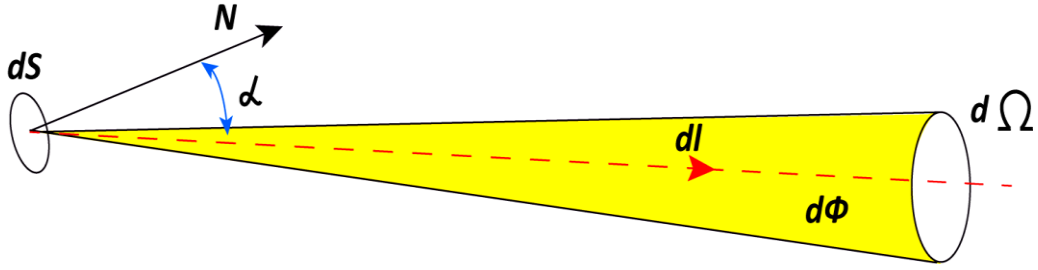


Рис. 4.15. *Параметри яскравості*

$$L = \frac{d^2\Phi}{dSd\Omega\cos\alpha},$$

де Ф – світловий потік;
$d\Omega$ – тілесний кут, що заповнений випромінюванням;
dS – поверхня випромінювання;
α – кут між перпендикуляром до ділянки випромінювання і напрямком випромінювання.

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 еталона 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 свіжозораному чи давно не ораному полі) світліша від прилеглого поля, хоч тип ґрунту і мінеральний його склад ідентичні.

4.5.2. Коефіцієнт інтегральної (ахроматичної) яскравості

Коефіцієнт інтегральної (ахроматичної) яскравості *(КІЯ, r)* ***– відношення інтегральної яскравості об'єкта в заданому напрямку*** *(B)* ***до інтегральної яскравості ідеальної відбивної поверхні*** B_0, ***що визначається за однакових умов освітленості і спостереження.***

$$r = \frac{B}{B_0}.$$

Кожному об'єкту відповідає певний КІЯ. Наприклад, для снігу, який щойно випав, він становить 1,0, для чорнозему – 0,03, піску кварцового – 0,20, суходільних луків – 0,07 тощо, в межах одного ландшафту і навіть однієї фації спостерігається істотне варіювання КІЯ.

У міру просування з півночі (від зони тундри) на південь (до зони пустель) коефіцієнт яскравості змінюється від 0,05 до 0,25. Середнє значення КІЯ загалом приймають рівним 0,15 (улітку) і 0,50 (взимку).

Ідеальною відбивною поверхнею (еталоном) вважають поверхню, яка повністю і за усіма напрямками відбиває випромінювання, що падає на неї (гіпсова та вкрита барієм пластини).

На земній поверхні найбільш поширеними є забарвлені об'єкти (хроматичні). Вважається, що природна палітра місцевості включає близько 60 000 колірних відтінків. Яскравість таких об'єктів в різних спектральних зонах неоднакова і характеризується *коефіцієнтами спектральної яскравості* (КСЯ, r_λ).

КІЯ завжди менший за одиницю, оскільки частина ЕМВ, що падає на об'єкти, поглинається. Ідеально біла поверхня, яку взято за еталон, має здатність рівномірно розсіювати випромінювання в усіх напрямках, і коефіцієнт її яскравості дорівнює одиниці.

4.5.3. Контраст яскравості

Для обчислення величин контрасту й інтервалу яскравості за однакових умов освітлення об'єктів можна замість яскравості використовувати коефіцієнти яскравості.

Контраст яскравості застосовується для характеристики відмінностей яскравості двох об'єктів (або суміжних деталей одного об'єкта) з яскравістю B_1 і B_2 ($B_1 < B_2$). Застосовують декілька взаємопов'язаних виразів для контрасту, серед яких найбільш уживаним є *відносний контраст* K_0:

$$K_0 = \frac{B_2}{B_1}$$

і так званий візуальний K_B:

$$K_B = \frac{B_2 - B_1}{B_2^*} = 1 - \frac{1}{K_0}.$$

Контраст між найсвітлішими $B_{\max}$ і найтемнішими $B_{\min}$ об'єктами визначає інтервал яскравості місцевості U, під яким розуміють відношення:

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

Влітку для лісових гірських районів U становить 100, а для степових – 2. Загалом же земна поверхня є мало контрастною – близько половини усіх об'єктів мають відносний контраст менше 1,5.

4.5.4. Індикатриси відбиття

Індикатриса відбиття (розсіювання) характеризує величину яскравості об'єкта залежно від напрямку спостереження.

Сукупність коефіцієнтів яскравості об'єкта за різними напрямками зображують графічно у вигляді полярних діаграм – *індикатрис відбиття*.

Розрізняють чотири основні види індикатрис відбиття. Властивістю дзеркального відбиття володіє спокійна вода, льодовий покрив, накатані ґрунтові дороги (рис. 4.16, *а*) [72].

Найбільшу яскравість при спостереженні проти Сонця мають об'єкти з гладкою (дзеркальною) поверхнею. Характерним представником цієї групи є спокійна водна поверхня, льодовий покрив, такири.

Такир (тюрк. – гладкий, рівний, голий) – форма рельєфу, утворена при висиханні засолених ґрунтів (такирних ґрунтів) у пустелях і напівпустелях.

Слабко шорсткуваті (матові) поверхні відбивають світло рівномірно (дифузно) в усі боки (рис. 4.16, *б*). Таку індикатрису, що називають *ортотропною або ламбертовою*, повинен мати розсіювач, що приймається за еталон. У природі до нього наближаються плоскі піщані поверхні.

Об'єкти з розчленованою поверхнею мають індикатрису відбиття, витягнуту до джерела світла (рис. 4.16, *в*). Максимальна яскравість таких об'єктів (орні ґрунти, зарості очерету) спостерігається з боку падаючих променів. Асиметрія індикатрис зростає зі збільшенням розчленованості поверхні відбиття.

Власне, будь-яке відбиття складається з двох частин – дзеркального і дифузного. Тому для багатьох природних об'єктів характерною є змішана індикатриса відбиття з двома максимумами: один спрямований в бік дзеркального відбиття, інший – до джерела світла (Сонця).

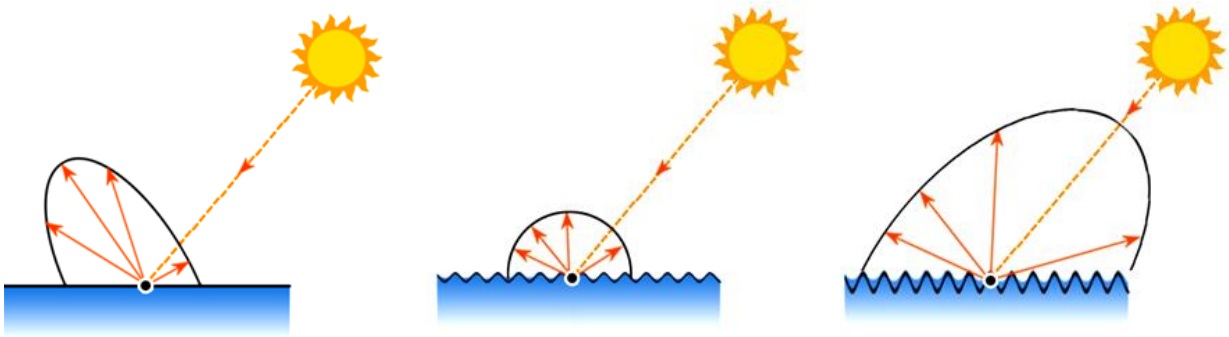


Рис. 4.16. *Індикатриса відбиття:*
а) гладкої поверхні; б) шорсткуватої поверхні; в) розчленованої поверхні

Індикатриси відбиття здійснюють вплив на особливості зображення однієї й тієї ж місцевості на знімках, отриманих при різних напрямках знімання (рис. 4.17).

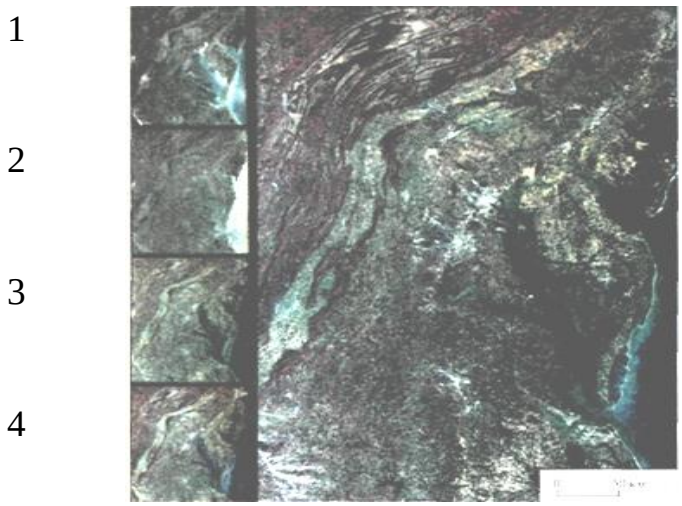


Рис. 4.17. *Вплив індикатриси відбиття на характер зображення місцевості (знімки MISR/Terra з різними напрямками зйомки: 1, 2 – вперед, 3, 4 – назад, 5 – в надир). Чезапикський залив, Аппалачі, США*

4.5.5. Коефіцієнт спектральної яскравості

Коефіцієнт спектральної яскравості (КСЯ) характеризує величину відбитого потоку випромінювання в заданому напрямку порівняно з потоком, що падає для певного вузького діапазону спектра.

Коефіцієнт спектральної (хроматичної) яскравості *(КСЯ)* r_λ ***– це відношення монохроматичної яскравості об'єкта*** B_λ ***й ідеальної відбивної поверхні*** $B_{0\lambda}$***, що виміряні за однакових умов освітленості і спостереження.***

$$r_\lambda = \frac{B_\lambda}{B_{0\lambda}}, \text{ або } r_\lambda = \frac{B_\lambda}{B_{0\lambda}} \cdot 100\%,$$

де B_λ і $B_{0\lambda}$ – спектральні яскравості об'єкта й еталона.

Еталонами виступають матеріали з добре відомими і стабільними у часі оптичними характеристиками (гіпсові пластинки, матове скло), які освітлюються сонцем або вбудованими в спектрометри каліброваними джерелами світла.

Оскільки об'єкти земної поверхні мають певне забарвлення, їх яскравість у різних спектральних зонах неоднакова, то й характеризуються вони різними КСЯ. Значення коефіцієнтів спектральної яскравості для різних довжин хвиль подають у формі графіка – *кривої спектральної яскравості* (рис. 4.18).

По його горизонтальній осі позначені довжини хвиль електромагнітного спектра, по вертикальній – коефіцієнти спектральної яскравості.

На знанні спектральної яскравості об'єктів засновані різні способи та прийоми отримання аеро- та супутникових знімків (багатозональна, гіперспектральна зйомки) і їх обробки, зокрема й автоматичне розпізнавання об'єктів за знімками.

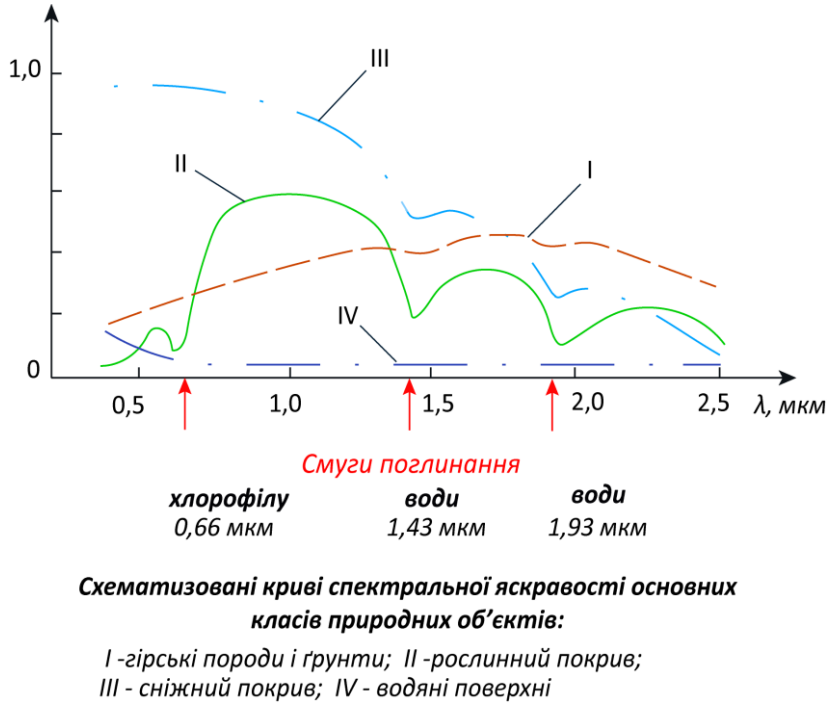


Рис. 4.18. *Криві спектральної яскравості природних об'єктів*

Рис. 4.19. *Кринов Євген Леонідович*

Тому вивчення спектральної відбивної здатності об'єктів підстильної поверхні є одним із завдань дистанційних методів. Основний шлях вивчення спектральної відбивної здатності – експериментальний при проведенні лабораторного, польового або аерокосмічного спектрометрування.

У цій галузі фундаментальними є дослідження професора Є. Л. Кринова (рис. 4.19), що розробив спектрометричну класифікацію природних утворень у видимому діапазоні ЕМХ ще в 40-х рр. XX ст. [84], які згодом були продовжені в ІЧ діапазоні.

Поклавши початок роботам з оптики ландшафтів, він розробив першу спектрометричну класифікацію, яка з часом стала класичною. За спектральною

яскравістю у видимому діапазоні, де отриманий найбільший об'єм експериментальних даних, уся розмаїтість об'єктів земної поверхні чітко поділяється на чотири класи, кожний з яких є своєрідною кривою спектральної яскравості (рис. 4.18).

У таблиці 4.1 наведено значення деяких коефіцієнтів інтегральної яскравості *r,* визначених у прямовисному напрямку, які свідчать про їх значні коливання у різних об'єктів.

Як видно з табл. 4.1, коефіцієнт інтегральної яскравості *r* суттєво змінюється навіть у межах одного класу природних утворень.

Якщо ділянку місцевості розглядати як сукупність *n* окремих об'єктів площею $\overline{S_i}$, в межах якої r_i є постійним, то середнє значення коефіцієнта $r_{сер}$ для ділянки в цілому можна подати:

$$r_{сер} = \frac{\sum_{1}^{n} r_i \overline{S_i}}{\sum_{1}^{n} \overline{S_i}} .$$

Таблиця 4.1

Коефіцієнти інтегральної яскравості деяких об'єктів у видимому діапазоні *[77]*

Об'єкт	*r*	**Об'єкт**	*r*
Сніговий покрив	0,8–0,09	Ліс листяний улітку	0,04–0,68
Лід річковий	0,3–0,35	Ліс листяний узимку	0,05–0,11
Вода	015–0,01	Ліс хвойний	0,63–0,46
Пісок сухий	0,14–0,46	Дороги ґрунтові сухі	0,12–0,31
Чорнозем зораний мокрий	0,02–0,06	Дороги ґрунтові мокрі	0,03–0,07
Чорнозем зораний сухий	0,02	Шосе сухе	0,08–0,22

Коефіцієнти інтегральної і спектральної яскравості можуть визначатися для різних напрямків відбиття випромінювання.

Коефіцієнти інтегральної і спектральної яскравості в загальному випадку залежать від багатьох факторів:

$$r_\lambda = f(\lambda, h_0, A_0, \frac{D}{Q}, A, \varphi, ...),$$

де λ – довжина хвилі, на якій визначають КСЯ;

h_0 – висота сонця;

A_0 – азимут сонця відносно структури поверхні об'єкта;

D – потік розсіяного сонячного випромінювання;

Q – потік сумарного сонячного випромінювання;

A – азимут напрямку спостережень відносно площини головного вертикала;

φ – кут відхилення напрямку спостережень від відвісного напрямку.

Яскравість об’єктів у різних спектральних зонах може бути різною (рис. 4.20).

В ДЗЗ розрізняють *криві спектральної яскравості об’єктів*, що отримують за результатами прямих спектрометричних вимірів, і так звані *криві спектрального образу*, що визначається зазвичай за некаліброваними багатозональними знімками. Хоча досить часто поняття "спектральний образ" трактується більш широко й поєднує і те і інше.

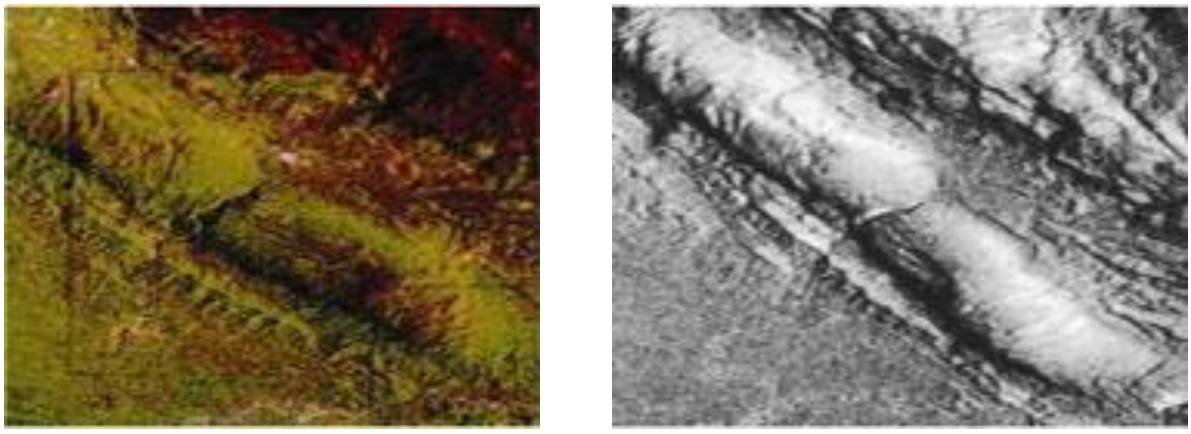


Рис. 4.20. *Порівняння яскравості об’єкта у видимому діапазоні (ліворуч) і радіодіапазоні (праворуч)*

Спектральні сигнали природних об’єктів відрізняються залежно від їх класу інтенсивністю та шириною діапазону відбитого випромінювання і температурою. Спектральні характеристики об’єктів слугують розпізнавальними ознаками при ДЗЗ.

Як уже зазначалось, спектральна яскравість об’єктів визначається головним чином експериментальним шляхом. КСЯ вимірюють переважно за допомогою фотоелектричних приладів (спектрометрів) шляхом порівняння двох відбитих променистих потоків – від досліджуваного об’єкта і від еталона.

Точність визначення коефіцієнтів спектральної яскравості характеризується відносною похибкою в 5–10 % при спектральному розрізненні 0,10–0,2 мкм. Спектральну відбивну здатність вивчають лабораторно, на полі, з літаків і космічних апаратів.

Спектрометричні виміри, що виконуються з точністю 5–10 %, можуть бути *лабораторними*, наземними (*на полі)*, *аеро- та космічними, синхронними [72]*.

Лабораторні спектрометричні виміри невеличких за розмірами зразків виконують для виявлення залежності відбивної здатності, наприклад, ґрунту від вмісту гумусу, механічного складу, вологості тощо.

Польове спектрометрування здійснюється з метою визначення КСЯ й індикатрис відбиття окремих об’єктів і геосистем нижчих рангів.

У польових умовах вивчають добову і сезонну динаміку відбивної здатності природних об’єктів, їх залежність від фенологічної фази розвитку рослинності, вплив погодних умов (дощ, вітер тощо) і умов спостереження (положення Сонця, кут візирування).

Аероспектрометрування виконується з літака або гелікоптера для дослідження більш великих і менш однорідних об'єктів – сільськогосподарських угідь (полів), водойм тощо.

Супутникове спектрометрування. Принципова особливість космічного спектрометрування полягає в тому, що спектрометр, встановлений на космічному апараті, реєструє сумарне випромінювання земної поверхні й атмосфери. Тому одним із завдань космічного спектрометрування є дослідження впливу атмосфери на оптичні характеристики земних об'єктів.

Синхронні спектрометричні виміри на землі, з літака і космічного апарату проводяться для оцінки впливу атмосфери на оптичні характеристики об'єктів. Потрібно враховувати, що відбивна здатність, наприклад, окремого деревного листя (лабораторні виміри) відрізняються від відбивної здатності дерева (наземні виміри), а вона, в свою чергу, від відбивної здатності ділянки лісу (аеровиміри) або лісового масиву (космічні виміри).

При практичному використанні результатів спектрометрування потрібно враховувати, що відбивна здатність, наприклад, окремого деревного листка (лабораторні виміри) відрізняється від відбивної здатності дерева (наземні виміри), а вона, в свою чергу, – від відбивної здатності ділянки лісу (літакові виміри) або лісового масиву (космічні виміри).

На знанні спектральної яскравості об'єктів ґрунтуються різні способи та прийоми одержання й обробки аеро- та супутникових знімків, зокрема й автоматичне розпізнавання об'єктів. Тому вивчення спектральної відбивної здатності різних об'єктів і геосистем різних таксонометричних рангів є одним із завдань.

4.6. Спектральна відбивна здатність природних об'єктів

Спектральні характеристики об'єкта безпосередньо пов'язані з енергетичною структурою речовин, що входять до його складу, і тим самим містять інформацію про склад об'єкта, його структуру, стан тощо. Вивчення характеристик відбивної здатності дає теоретичну основу для інтерпретації об'єктив за набором спектральної яскравості або за їх співвідношеннями.

4.6.1. Класифікація природних об'єктів за спектральною яскравістю

За спектральною яскравістю у видимому діапазоні, де отриманий найбільший об'єм експериментальних даних, усе розмаїття об'єктів земної поверхні поділяється на декілька класів, для кожного з яких характерний свій вид кривої спектральної яскравості (рис. 4.18).

І. Гірські породи і ґрунти характеризуються збільшенням КСЯ у міру наближення до червоної зони спектра. Спектральна яскравість гірських порід залежить від мінералів і елементів, що входять до їх складу, а ґрунтів – від вмісту сполучень заліза і гумусу.

II. Рослинний покрив відрізняється характерним максимумом відбивної здатності в зеленій (0,55 мкм), мінімумом – у червоній (0,66 мкм) і різким зростанням відбиття в ближній ІЧ зоні. Низька відбивна здатність вегетуючих рослин у червоній зоні пов'язана з поглинанням, а її збільшення в зеленій – з відбиттям цих променів хлорофілом. Більші коефіцієнти яскравості в ближній та ІЧ зоні пояснюються пропусканням цих променів хлорофілом і відбиттям їх від внутрішніх тканин листя.

III. Сніговий покрив має найвищі значення КСЯ з невеличким їх зниженням у ближній ІЧ зоні спектра. Близьким до цього класу за характером відбиття є хмарні утворення, які мають декілька вузьких смуг поглинання в довгохвильовій частині спектра.

IV. Водні поверхні характеризуються найнижчими значеннями і монотонним зменшенням відбивної здатності від синьо-фіолетової до червоної зони спектра, оскільки довгохвильове випромінювання поглинається водою сильніше.

Загальним для усіх об'єктів є зменшення КСЯ в зоні 2–3 мкм. Звертають на себе увагу два мінімуми в кривих при довжинах хвиль 1,43 і 1,93 мкм, що обумовлені смугами поглинання води. Особливо вони помітні в кривій відбиття зеленої рослинності, де вони додаються вже до відзначеного мінімуму в зоні 0,66 мкм.

4.6.2. Спектральна відбивна здатність ґрунтів

Спектральні характеристики ґрунтів серйозно досліджувались у період освоєння аерометодів у ґрунтознавстві [112; 38]. У 70-х рр. XX ст. поява супутникових багатозональних знімальних систем викликала до життя бурхливу активізацію досліджень спектральної яскравості ґрунтів і рослинності в різних країнах; у колишньому СРСР з'явились фундаментальні монографії К.Я. Кондратьєва і П. П. Федченка [74]. Створені перші каталоги й атласи спектральних характеристик ґрунтів. Такий каталог, зокрема, був створений у Санкт-Петербурзькому університеті. Ґрунтовні дослідження були виконані у Всесоюзному науково-дослідному інституті сільськогосподарської метеорології [109]. В цих працях проаналізовані закономірності змін спектральної відбивної здатності ґрунтів різних географічних зон, досліджені чинники, які впливають на спектральні відбивні властивості ґрунтів: поверхнева структура, ступінь обробки, вологість. Одержані закономірності важливо враховувати при дешифруванні багатозональних знімків, оскільки вони є основою роботи з гіперспектральними знімками [83].

Характерною особливістю сухих ґрунтів різної генетичної належності є поступове зростання коефіцієнтів спектральної яскравості зі збільшенням довжини хвилі в діапазоні від 0,4 до 2 мкм. При цьому абсолютне значення коефіцієнтів спектральної яскравості на всій цій ділянці спектра зростають від чорноземів, що займають у сімействі кривих спектральної яскравості ґрунтів найнижче місце, до каштанових, сірих лісних, підзолистих ґрунтів і далі до буроземів, сіроземів, солончаків.

Сімейство кривих спектральної яскравості різних ґрунтів віялом розходиться зі зростанням довжин хвиль у видимому діапазоні. Найбільші відмінності в яскравості різних ґрунтів спостерігаються в червоній і ближній інфрачервоних зонах, близько 0,7 мкм (рис. 4.21).

Зростання коефіцієнтів яскравості спостерігаються до середнього інфрачервоного діапазону, до 2 мкм, а потім вони поступово зменшуються. При цьому, як і для інших об'єктів земної поверхні, характерні мінімуми в зонах поглинання ЕМВ водою при λ = 1,43 мкм і λ = 1,93 мкм.

Найбільш помітною властивістю випромінювання, відбитого від сухих ґрунтів, є зазвичай зростання значень коефіцієнтів відбиття зі збільшенням довжини хвилі, особливо у видимому і ближньому ІЧ діапазонах. Взаємодія випромінювання з ґрунтом зводиться до того, що падаюче випромінювання або відбивається, або поглинається.

Криві спектральної відбивної здатності деяких ґрунтів подано на рис. 4.22.

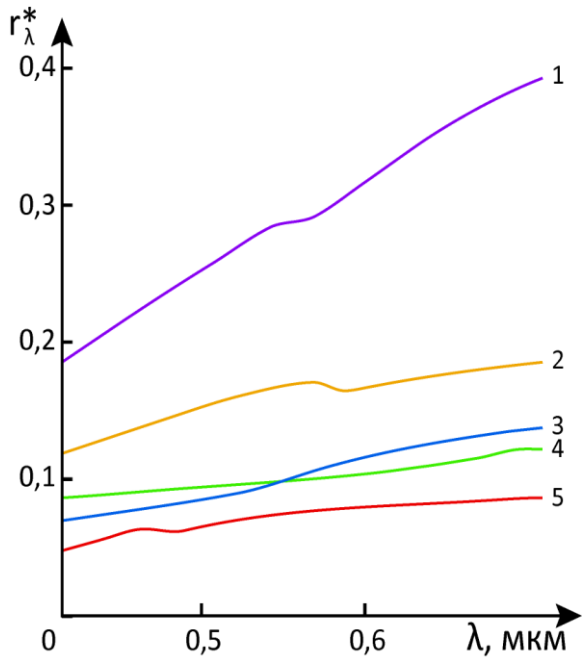


Рис. 4.21. *Криві спектральної яскравості основних типів ґрунтів: 1 – сірозем; 2 – дерново-підзолисті; 3 – темно-каштанові; 4 – темно-сірі лісні; 5 – чорнозем*

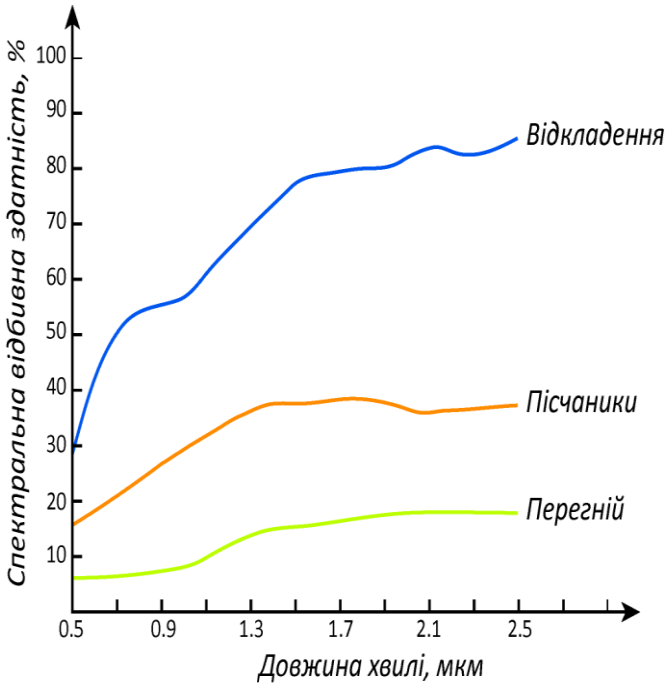


Рис. 4.22. *Криві спектральної відбивної здатності деяких ґрунтів*

Ґрунти складаються з порід з різними фізичними та хімічними властивостями, що можуть впливати на характеристики відбиття і поглинання. Хоча форми кривих спектральної відбивної здатності ґрунтів схожі між собою, амплітудні характеристики цих кривих можуть помітно відрізнятися залежно від властивостей ґрунту. На спектральну відбивну здатність ґрунтового покриву можуть мати суттєвий вплив кількість органічної речовини в ґрунті, вологість

ґрунту, наявність окису заліза, відносна частка піщаників і відкладень, а також нерівність поверхні.

Органічна речовина відіграє домінуючу роль у спектральній яскравості ґрунтів гумідних районів при вмісті гумусу в інтегральному відбитті ґрунту. Органічна речовина характеризує кількість азоту в ґрунті.

Гумус, у загальному випадку, знижує спектральну яскравість, проте гумус з перевагою фульвокислот[12] підвищує яскравість у червоній зоні спектра. Окиси заліза також обумовлюють максимальну яскравість у червоній зоні спектра.

Помічено, що зв'язок між кольором ґрунту і вмістом у ньому органічних речовин залежить від кліматичної зони. За високої температури ґрунти з низьким вмістом вологи (великі грудки) містять більше органічних речовин, ніж такі ж ґрунти в більш холодних кліматичних зонах.

Кореляційні зв'язки між коефіцієнтами відбиття ґрунтів і вмістом у них гумусу та карбонатів досліджені на прикладі типових чорноземів [71]. Виявилося, що при вмісті гумусу менше 5 % спостерігається пряма логарифмічна залежність між кількістю гумусу й інтегральним відбиттям ґрунту.

Для кліматичних зон відносний вміст органічних речовин у ґрунті коливається в інтервалі від 0,5 до 5 %. При 5 % вмісту органічних речовин ґрунт зазвичай має темно-коричневий або чорний колір, а при меншому вмісті – світло-коричневий або світло-сірий. При цьому у видимому діапазоні спектра залежність відбивної здатності ґрунту від вмісту органічних речовин є нелінійною.

КСЯ варіює для різних типів ґрунтів: якщо для дерново-підзолистих (автоморфних) він становить 16,3, то для дерново-підзолистих заболочуваних – 7,2, дерново-глеєвих – 5,2. Він також різний і для ґрунтів одного типу та залежить від їх зволоження, вмісту гумусу і гранулометричного складу. При підвищенні вологості ґрунтів їх яскравість зменшується (при повному насиченні водою – удвічі), але характер кривої спектральної відбивної здатності не змінюється.

Наприклад, для дерново-підзолистих слабкоглеюватих (тимчасово надлишково зволожених) він становить 9,0, глеюватих – 7,1 і глейових – 6,7.

КСЯ варіюють у певних межах і для об'єктів одного типу. Так, на відбивну здатність гірських порід впливають запорошеність, різні поверхневі вицвітання і кори, спектральне відбиття яких порівняно з вихідною породою може істотно відрізнятись.

Отже, при оцінці залежності спектральної відбивної здатності від кількості органічних речовин потрібно враховувати ще й кліматичний пояс та умови дренування.

Оксид заліза. Спектральна відбивна здатність ґрунту в значному ступені залежить від наявності в ньому оксиду заліза, що може викликати істотне зниження відбивної здатності, зокрема у видимому діапазоні. Як видно з рис. 4.23, відбивна здатність ґрунту у видимому діапазоні обернено пропорційна концентрації оксиду заліза.

---

[12] **Гумі́нові кисло́ти** (англ. *humic acids,* нім. Huminsäuren (f pl)) – неплавкі аморфні темно забарвлені речовини, входять до складу органічної маси торфу, бурого вугілля і ґрунту.

Видалення з ґрунту цього елемента призводить до помітного збільшення відбивної здатності в діапазоні від 0,5 до 1,1 мкм, але мало впливає на відбивну здатність при довжині хвилі більше 1,1 мкм. Варто зазначити, що аналогічний ефект у тих же спектральних діапазонах спостерігається і при видаленні з ґрунту органічних речовин (рис. 4.24).

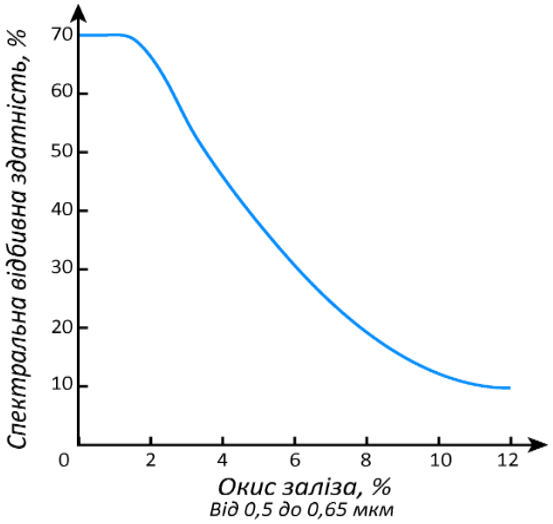


Рис. 4.23. *Залежність спектральної відбивної здатності ґрунтів від вмісту окису заліза*

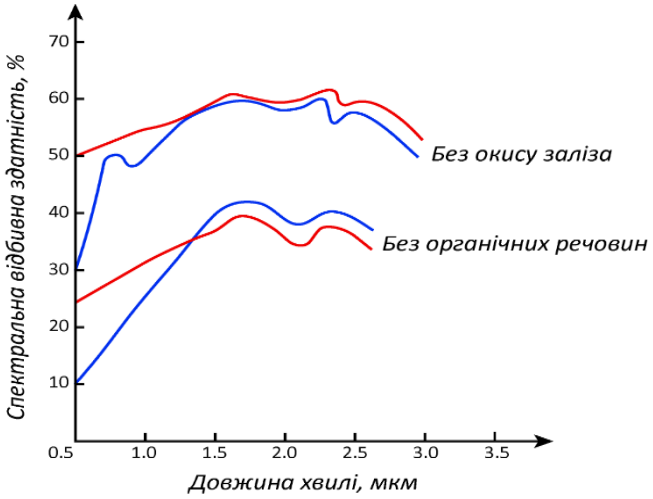


Рис. 4.24. *Вплив вмісту окису заліза та органічних речовин на спектральну відбивну здатність ґрунтів*

Поверхнева структура і гранулометричний склад ґрунтів. Спектральна яскравість ґрунтів залежить від поверхневої структури, розміру агрегатів, щільності упаковки, шорсткості поверхні. Більш дрібні частинки ґрунту щільніше заповнюють об'єм і дають більш вирівняну поверхню порівняно зі складною поверхнею, що утворена крупними агрегатами. У гладкої щільної поверхні коефіцієнти яскравості вищі, ніж у пухкої [83].

Структура ґрунтів впливає на відбивну здатність сильніше, ніж гранулометричний склад.

Безструктурні ґрунти відбивають на 10–15 % більше світла від добре структурованих. Саме тому виникають розбіжності в результатах лабораторних і польових вимірів. Наприклад, на аерознімках піщані поверхні мають більш високу яскравість, на відміну від глинистих, в той час як лабораторні виміри показують протилежну картину, оскільки ґрунтові агрегати зменшують відбивну здатність ґрунтів.

Наземні і космічні визначення спектральної яскравості ґрунтів дають результати, що трохи відрізняються (рис. 4.25) [83].

У спеціально проведених підсупутникових експериментах виявлено, що загальна яскравість ґрунтово-рослинних угрупувань, що реєструється з космосу, вища, ніж у наземних умовах, причому найбільші розбіжності спостерігаються в синьо-зеленій зоні спектра [126]. Це підвищення пов'язане з впливом атмосферного серпанку. Його потрібно враховувати при роботі з багатозональними знімками, вводячи відповідні виправлення. При автоматизованій обробці багатозональних

знімків передбачається спеціальний підготовчий етап атмосферної корекції, на якому в яскравість об'єктів на знімках у короткохвильових зонах уводяться поправочні коефіцієнти, що визначаються на основі калібрувальних даних [83].

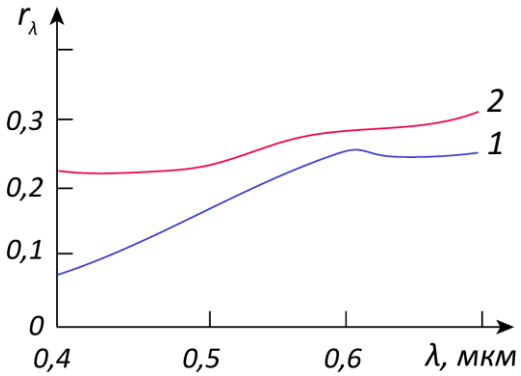


Рис. 4.25. *Результати наземних (1) і космічних вимірів (2) спектральної яскравості ґрунтів піщаної пустелі*

При роботі з супутниковими знімками потрібно враховувати, що на спектральну яскравість, яка реєструється, впливає і просторове розрізнення знімальних систем. При комплексному ґрунтовому покриві ділянки різних ґрунтів можуть бути менші від величини просторового розрізнення, і в результаті зйомки отримують інтегральні характеристики спектральної яскравості всіх компонентів, що потрапили в елементарну ділянку (піксель сканерного знімка), яскравість якої реєструється.

При частковому покритті ґрунту рослинністю, коли зайняті рослинністю ділянки менші від просторового розрізнення знімків, відбивні властивості системи "ґрунт – рослинність" змінюються, яскравість у червоній зоні знижується, в ближній інфрачервоній – зростає. Цей вплив дається взнаки при покритті ґрунту рослинністю від 20 до 60 %; більш низьке проєктивне покриття слабко впливає на яскравість ґрунтів, а при більш високому яскравість визначається рослинністю [83].

На яскравість ґрунтів впливає гранулометричний склад, що визначається відносним вмістом піску, відкладів, глини. Характерний діаметр частинок глини – 0,002 мм, відкладень – від 0,002 до 0,005 мм, піску – від 0,05 до 2 мм. Через такий розподіл глина містить більше частинок, ніж пісок. За наявності вологи кожна частинка ґрунту вкрита тонким шаром води, що займає певний простір між окремими частинками. Хоча цей шар надзвичайно тонкий, мільйони частинок можуть утримувати величезну кількість води. Саме тому зв'язок між кількістю частинок і її вологістю має таке важливе значення.

Таким чином, спектральна яскравість ґрунтів багато в чому залежить від їх складу, який визначає як розмір складових частин ґрунту, так і можливий рівень вмісту вологи. За інших рівних умов зі зменшенням розміру частинок поверхня ґрунту стає більш гладкою і частка відбитого випромінювання зростає. Доведено, що при збільшенні розміру частинок з 0,22 до 2,66 мм коефіцієнт поглинання збільшується на 14 %.

Вологість. Відбивна здатність ґрунтів залежить від вологості ґрунтів – зволоження викликає зменшення спектральної яскравості без зміни характеру кривої (рис. 4.26).

Однак у літній період ґрунти швидко висихають з поверхні до повітряно-сухого стану, тому при однорідному механічному складі яскравість ґрунтів визначається головним чином наявністю гумусу.

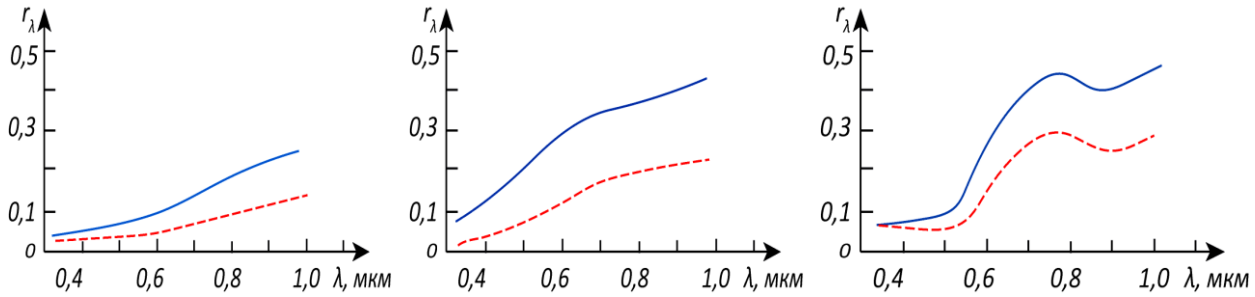


Рис. 4.26. *Вплив вологості ґрунтів на їх спектральну яскравість: а) чорноземи; б) педальфери (ґрунти, збагачені залізом і алюмінієм); в – латеритні ґрунти: ——— сухі, – – – вологі*

Типові криві спектральної відбивної здатності піщаників при різних рівнях вмісту вологи подано на рис. 4.27.

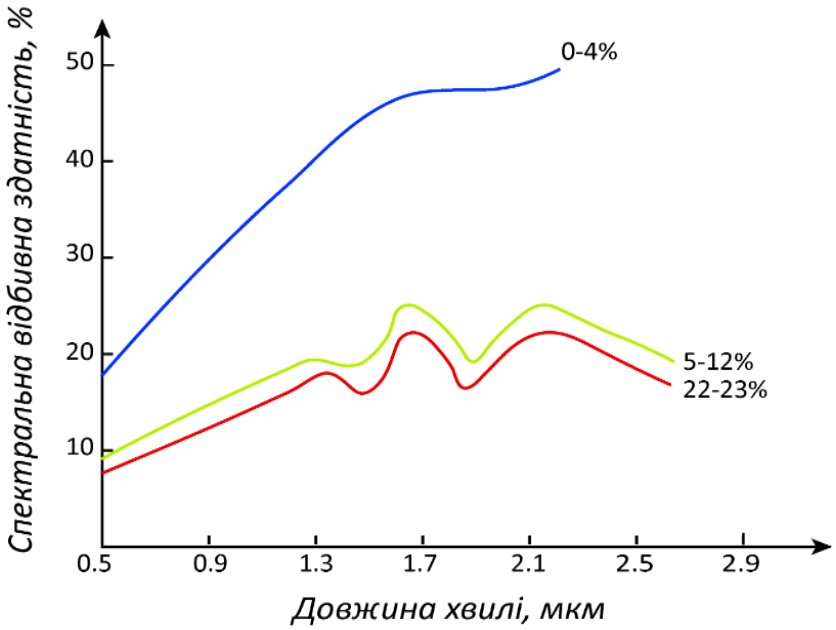


Рис. 4.27. *Залежність спектральної відбивної здатності піщаників від рівня вологості*

Відбивна здатність сухих піщаників залишається майже постійною, в той час як криві спектральної відбивної здатності вологих піщаників мають помітні провалини при довжинах хвиль 1,4; 1,9 та 2,3 мкм.

У видимій частині спектра також спостерігається помітне зниження відбивної здатності вологих ґрунтів порівняно з сухими.

З наведеного можна зробити наступні висновки про спектральні характеристики ґрунтів:

– збільшення вологості ґрунту призводить до зниження його відбивної здатності в усьому спектральному діапазоні відбитого ЕМВ;

– відбивна здатність ґрунту збільшується зі зменшенням розміру його складових частин;

– зменшення нерівності поверхні призводить до збільшення її відбивної здатності;

– відбивна здатність ґрунту зменшується зі збільшенням вмісту у ньому органічних речовин.

4.6.3. Спектральна відбивна здатність рослинності

Спектральні характеристики рослинності головним чином визначаються здатністю їх листя пропускати, поглинати і відбивати ЕМВ та суттєво залежать від довжини ЕМХ.

На рис. 4.28 наведено криві, що свідчать про результати вимірів частки відбитого випромінювання для різних поверхонь (у відсотках від сонячного випромінювання, що падає на поверхню) залежно від довжини хвилі.

Рослинність (зелена трава і сосновий ліс) має характерний максимум відбиття в зеленій зоні спектра, а також більш високі максимуми в ІЧ зоні. Те, що спектральна картина відбиття має свої особливості для кожного типу поверхні, дозволяє будувати алгоритми розпізнавання різних поверхонь за вимірами відбитого від них випромінювання.

У видимому діапазоні відбувається доволі сильне поглинання з великим максимумом відбивної здатності в зеленій частині спектра. При цьому тільки невеличка частина сонячної енергії відбивається від поверхні листя, яка практично є прозорою для ЕМВ у видимому діапазоні.

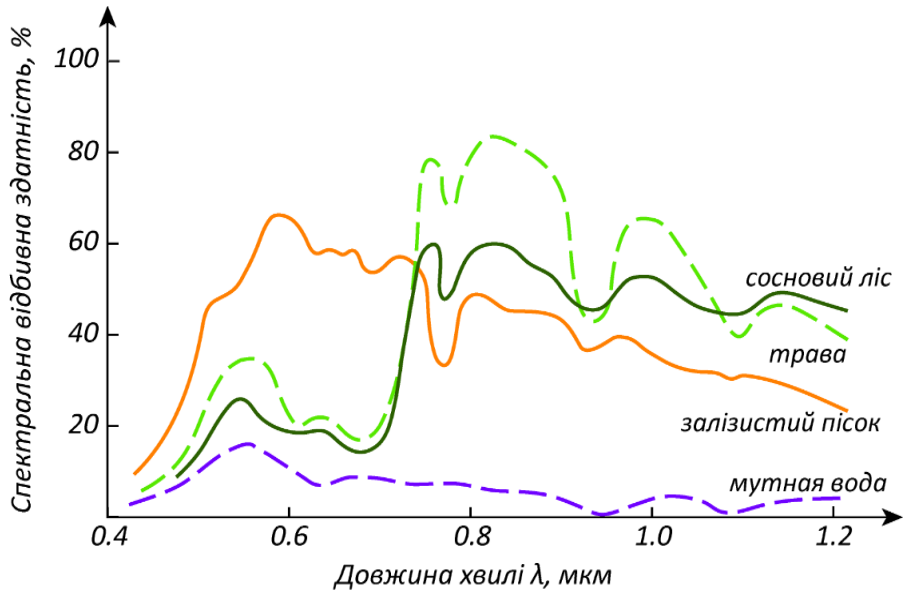


Рис. 4.28. *Залежність відбитого випромінювання від довжини хвилі для різних поверхонь*

Поглинання і відбиття відбуваються у хлоренхімі[13]. Хлорофіл поглинає сонячне випромінювання синього і червоного діапазона спектра, а випромінювання в зеленому діапазоні здебільшого відбиває. Цим і пояснюється зелений колір листя, трави, рослин і локальний максимум спектральної кривої в цій зоні, який відповідає довжині хвилі 0,45 мкм.

При збільшенні екологічного навантаження на рослинність вміст хлорофілу в рослинності знижується, а відбивна здатність підвищується, особливо в червоному діапазоні, через що рослинність отримує жовтий або хлоротичний відтінок.

Важливу роль відіграють й інші пігменти, зокрема каротин, ксантофіл (жовтий пігмент) і антоціан (червоний пігмент).

Каротин і ксантофіл часто зустрічаються в листі, однак їх вікна поглинання знаходяться в синьому діапазоні (0,545 мкм), де домінуючим є вплив хлорофілу, тому вплив цих пігментів проявляється лише за його відсутності. Деякі види дерев виробляють у великих кількостях антоціан і через те мають червоний колір.

При уважному вивченні впливу різних пігментів на відбивну здатність рослинного покриву виявляється, що, на відміну від видимого діапазону, в якому спостерігаються значні розбіжності, в ближньому і середньому ІЧ діапазонах цих відмінностей майже не існує.

У близькій ІЧ частині спектра спостерігається істотне збільшення відбивної здатності при переході через порубіжне значення 0,7 мкм з видимої до ІЧ частини спектра. В цьому діапазоні зелений рослинний покрив характеризується високою прозорістю і низьким поглинанням (максимумом відбивної здатності). Значення коефіцієнтів відбиття і прозорості досягають величини 45–50 %, а частка поглиненого випромінювання становить усього приблизно 5 %. Важливу роль відіграє також структура листя.

Для ЕМХ цього діапазону поверхня листя і хлоренхіма є прозорими. Відбиття відбувається в іншому шарі мезофілу – губчастій паренхімі, що містить вакуолі повітря, й обумовлене її внутрішньою структурою. Важливу роль при цьому відіграють кількість, розмір і форма клітинок м’якоті листя, оскільки ці параметри визначають сумарну поверхню, на якій відбуваються процеси розсіювання і відбиття ЕМХ. Багаторазово повторюючись, вони спричиняють сильне результуюче відбиття потоку сонячного випромінювання у ближньому ІЧ діапазоні [76; 69; 122].

Відмінності у відбивній здатності одноярусної і багатоярусної деревної рослинності може досягати 85 %. Причина цього проста: додаткове випромінювання, що пройшло крізь перший ярус, відбивається від другого, а потім частково проходить ще раз крізь перший ярус. Цей ефект особливо стає помітним при порівнянні відбивної здатності в центрі досліджуваного масиву і на його околицях, де відсутня багатоярусність.

Зі збільшенням довжини хвилі (1,3–2,5 мкм) відбивна здатність зеленої рослинності знову зменшується. Це пов’язано з вікнами поглинання води, центри яких відповідають довжинам хвиль 1,43; 1,93. Існують також ще два вікна

[13] **Хлоренхіма** (від грецьк. chloros – зелений, enchyma – тканина), або асиміляційна тканина (від лат. assimilatio – уподібнюю), – основна фотосинтезуюча тканина, розташована в листках між верхньою та нижньою епідермою і молодих стеблах у первинній корі.

поглинання води поблизу 0,9 і 1,1 мкм, однак вони дуже вузькі і практично не впливають на криву спектральної відбивної здатності.

Піки спектральної відбивної здатності в середньому ІЧ діапазоні знаходяться на 1,6 і 2,2 мкм.

Відзначають також сильний вплив вологості: чим менша вологість листяного покриву, тим вища її відбивна здатність у видимому діапазоні і тим менша в ближньому ІЧ діапазоні.

Розглянуті особливості спектральних характеристик зеленої рослинності проявляються як в окремому листку, так і в рослинних угрупуваннях загалом, незалежно від їх виду. Важливим є той факт, що при якісному збігу характеристик різні види рослинності мають характерні особливості як у положенні піку спектра, так і в загальній конфігурації кривої спектрального відбиття. Ці особливості разом з іншими характеристиками (текстура, колір тощо) дозволяють ідентифікувати різні види рослин [122].

Спектральні характеристики рослинності зазвичай змінюються протягом вегетаційного сезону. При цьому різні види рослин мають свої часові періоди, коли особливості їх спектральних образів проявляються найбільш чітко. Саме в ці періоди доцільно використовувати дані ДЗЗ для їх розпізнавання.

Уявімо, що є виміри відбитого від усіх поданих на рис. 4.29 поверхонь випромінювання (у відсотках від падаючого сонячного випромінювання) на двох довжинах хвиль 0,55 і 0,85 мкм. Якщо подати ці виміри так, як показано на рис. 4.29, то видно, що усі типи поверхонь виявляються розділеними.

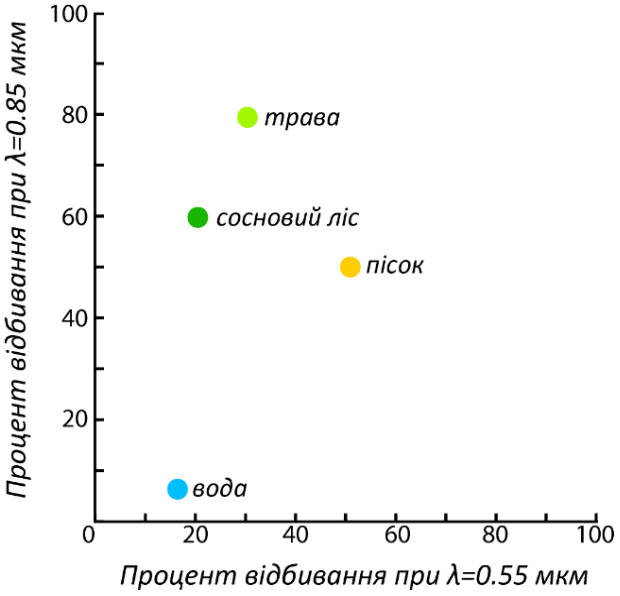


Рис. 4.29. *Спектральна картина відбиття для різних типів поверхонь на довжинах хвиль 0,55 і 0,85 мкм*

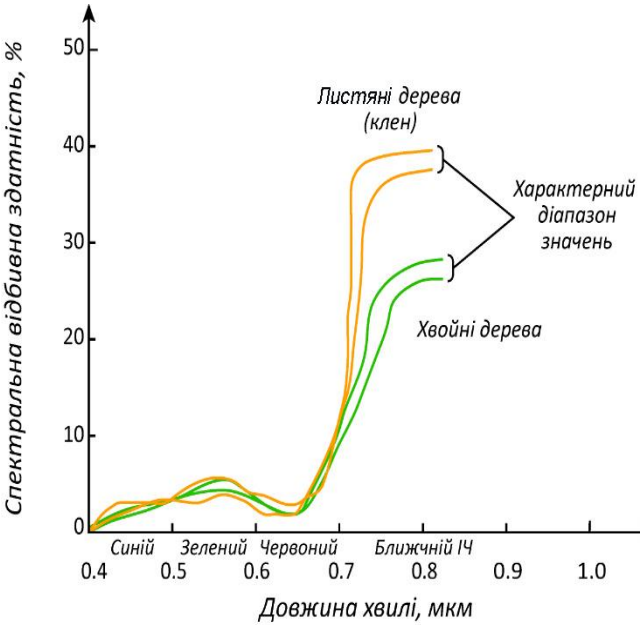


Рис. 4.30. *Криві спектральної відбивної здатності дерев*

Енергія падаючого ЕМВ характеризує освітленість об’єкта, а енергія відбитого випромінювання – його яскравість. Кожний об’єкт має власну криву

спектральної здатності, яка визначається як відношення енергії відбитого та падаючого випромінювання і є функцією довжини хвилі. Енергія падаючого ЕМВ характеризує освітленість об'єкта, а енергія відбитого випромінювання – його яскравість.

Зокрема, за допомогою такої кривої можна отримати загальну оцінку спектральної відбивної здатності об'єкта в певному відносно широкому діапазоні (наприклад, від 0,400 до 0,480 мкм), підвищуючи надійність вимірів.

Криві спектральної відбивної здатності будують для оптичної частини електромагнітного спектра (до 2,5 мкм).

На рис. 4.30 подано середні криві спектральної відбивної здатності листяних і хвойних дерев. Кожна з них є кривою, що огинає певний набір значень, оскільки значення спектральної відбивної здатності в різних видів листяних і хвойних дерев, як і у окремих дерев одного і того ж виду, ніколи повністю не збігаються. Крива спектральної відбивної здатності зеленої рослинності має досить характерний вигляд, її поведінка сильно змінюється залежно від довжини хвилі.

Рослинність є найбільш чутливою компонентою природних екосистем. На розвиток і фізіологічний стан рослинності, а отже, і на її спектральні характеристики сильний вплив здійснюють як довготривалі природні чинники (кліматична зона, ландшафт, тип ґрунту тощо), так і короткотривалі погодні (опади, коливання температури, сонячна радіація тощо). Велика кількість опадів і тепло сприяють швидкому росту біомаси, нестача опадів пригнічує її. Така реакція особливо відчувається в екстремальних ситуаціях, наприклад при різкій зміні рівня ґрунтових вод, засоленні або забрудненні ґрунту під час посухи. Нестача опадів спричиняє, зокрема, висихання губчатої паренхіми і зменшення вологи, що постачається нею. Наслідком цього буде різке зменшення відбивної здатності рослин і у ближньому ІЧ діапазоні спектра. На рис. 4.31 подано спектральну відбивну здатність здорового (крива 1) і пошкодженого (крива 2) листя [122].

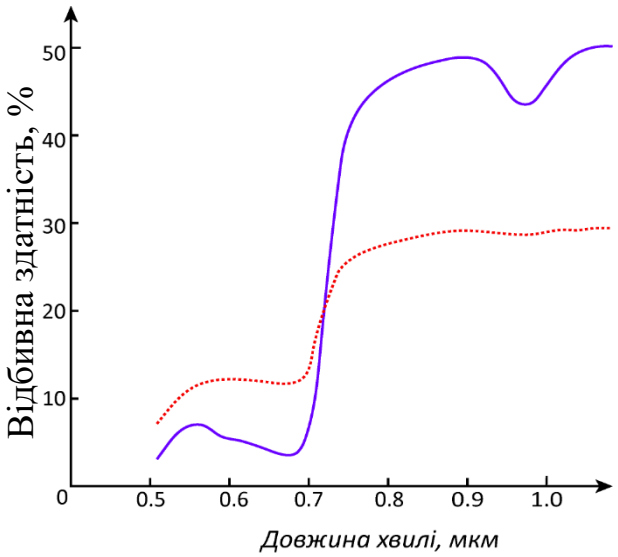


Рис. 4.31. *Спектральна відбивна здатність здорового (1) і пошкодженого (2) листя*

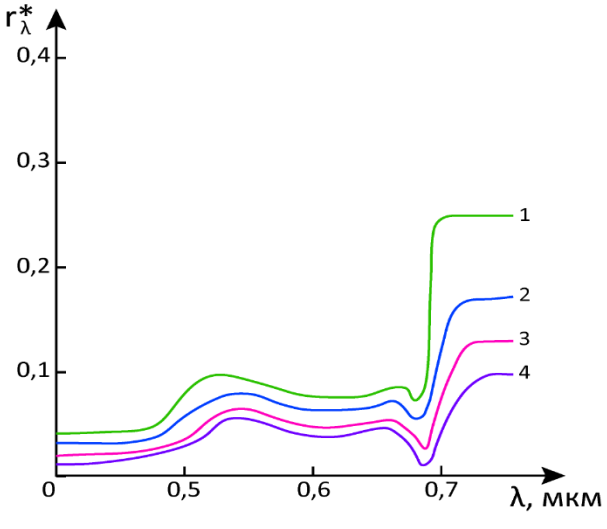


Рис. 4.32. *Криві спектральної яскравості дерев різних порід: 1 – береза; 2 – дуб; 3 – сосна; 4 – ялина*

Фізіологічний стрес рослин також спричиняє виродження хлорофілу. Як наслідок, зменшується поглинання, і відповідно, зростає відбиття сонячного ЕМВ в синій і червоній зонах спектра. При цьому зникає локальний максимум у зеленій зоні спектра і рослини втрачають зелений колір. Таким чином, крива спектрального відбиття у рослин, що знаходяться в несприятливих умовах, набуває більш порожнистого вигляду, а межа зміни відбивної здатності при переході від червоного до ближнього ІЧ діапазону помітно зменшується, як це показано на рис. 4.32.

Таким чином, зазначені закономірності слугують основою методів дистанційної індикації фізіологічного стану рослинності і раннього розпізнавання стресових ситуацій.

Рослини реагують на зміну зовнішніх умов зміною пігментації, структури мезофілу, вмісту вологи у листі тощо.

Крім того, потрібно зазначити:

– відмінність відбивної здатності рослинності у видимому, ближньому і середньому ІЧ діапазонах;

– домінуючу роль пігментації листяного покриву у видимій частині спектра;

– домінуючу роль структури рослинності у ближньому ІЧ діапазоні, де половина випромінювання пропускається, а половина відбивається;

– домінуючу роль вологості рослинного покриву в середньому ІЧ діапазоні, де більша частина поглинається листям.

Спектральна відбивна здатність, за якою поділяються класи, розрізняється в об’єктів усередині класу. Спектральна яскравість рослин змінюється з їх віком: вона вища у молодих рослин і нижча у тих, що перебувають у стадії повної зрілості.

Відбивна здатність рослинності залежить від фітопатологічних змін. При захворюванні рослин його листя починає слабше поглинати червоні і відбивати інфрачервоні промені. З усіх об’єктів суходолу рослинний покрив має найбільш інформативні спектральні характеристики, які чутливо реагують на його зміну.

Рослинність змінює свою відбивну здатність залежно від фітопатологічних змін і екологічних умов; впливають також величина проєктивного покриття, наявність пилу або роси.

На земній поверхні існує багато об’єктів, які за різними напрямками відбивають випромінювання різного спектрального складу. Наприклад, у складі відбитого випромінювання соняшника, який цвіте в східному напрямку, завжди переважають помаранчево-червоні промені, а в західному – зелені. Тому КСЯ природного об’єкта, що виміряні при визбируванні під різними кутами до земної поверхні, можуть слугувати його кількісними спектральними ознаками.

4.6.4. Спектральна відбивна здатність снігового покриву

Сніговий покрив – шар снігу на поверхні землі, що створюється в результаті снігопадів. Розрізняють *тимчасовий* сніговий покрив, що тане протягом декількох годин або днів після утворення, і *стійкий*, що лежить протягом усієї

зими або з невеликими перервами. Джерелом снігового покриву слугують тверді осади, що зберігаються на земній поверхні за від'ємних температур повітря. Вітрове перенесення снігу (завірюха) приводить до різкої нерівномірності його відкладення, особливо в горах. На рівнинах сніговий покрив найбільш рівномірно залягає під запоною лісу, а в лісостеповій і степовій зонах значна частина снігу зноситься в яри і балки.

Поверхня снігового покриву формується в основному під дією сонячної радіації і вітрів. Завірюхи приводять до формування сніговий мікрорельєфу. В проміжках між снігопадами на поверхні снігового покриву виникають *кірки* і *насти,* приховані новими горизонтами снігу. В результаті сніговий покрив утворює шарувату будову, що відображає метеорологічні умови минулої зими. З часом снігова товща осідає та ущільнюється, в ній відбуваються процеси сублімації перекристалізації снігу – перетворення пластинчастих і стовбчастих сніжинок на безформні зерна різного розміру.

Сніговий покрив має малу густину, яка з часом зростає, особливо навесні, коли в снігу з'являється рідка вода. Як правило, густина снігу не перевищує 500 кг/м^3. Відбивна здатність снігового покриву коливається від 80–90 % (сніг, який щойно випав) до 30–40 % (у старого снігу, що тане). Взимку повітря над сніговим покривом сильно охолоджується, навесні велика кількість тепла, що надходить, затрачується на танення снігового покриву. Талі води формують значну частину річкового стоку на Землі.

Матеріали ДЗЗ надають можливість одночасної фіксації поширення снігового покриву та його динаміки. Ці характеристики є основою оперативного картографування снігового покриву передусім для складання гідрологічних прогнозів. З цією метою використовуються МДЗ з метеорологічних супутників, які забезпечують регулярне надходження інформації.

Глобальне дослідження динаміки снігового покриву континентів і річного снігового покриву в глобальному масштабі виявилось ефективним для кліматологічного аналізу, оскільки з межами цих явищ, особливо морських льодів, пов'язані процеси утворення циклонічних вихорів, збільшення льодового і снігового покриву посилює циклогенез.

МДЗ виявились дуже цінними матеріалом для дослідження гляціологічних об'єктів, які характеризуються великою сезонною мінливістю, розповсюдженням у важкодоступних і складних для наземних спостережень місцях. Зазвичай різні види сніжно-крижаних утворень дуже сильно диференціюються за своїм просторовим і режимним характером, тому потребують застосування різних видів космічної інформації [72].

Широкі можливості надають багатозональні МДЗ для дослідження сніготанення і здійснення гідрологічного прогнозу, оскільки відбивна здатність снігу, що тане, у ближньому ІЧ діапазоні різко знижується, порівняння зображень у видимому і ближньому ІЧ діапазоні забезпечує виділення районів перезволоженого снігу. Сезонне переміщення зони танення по язику гірського льодовика можна зафіксувати за допомогою радіолокаційних знімків, де яскравість зображення залежить від його вмісту вологи.

Широкі можливості надають аеро- та супутникові знімки високого розрізнення для моніторингу снігових лавин, за допомогою яких можна дешифрувати сліди сходу лавин у вигляді крупних лавинних сніжників у балках і на конусах виносу, снігових мостів на річках і лавинних прочосах серед лісової рослинності на схилах. За цими ознаками можна виділити мережу лавинозборів і отримати різні характеристики лавинної небезпеки, підрахувати густину мережі лавинозборів.

Гірські льодовики гарно виділяються на знімках високого розрізнення. На знімках розрізняються межі і площі льодовиків, фірнові лінії, крупні моренні гряди, зони крупних льодопадів, відкладені морени, що оточують льодовик. Такі знімки можуть стати у пригоді для уточнення зображень льодовиків на топографічних і загальногеографічних картах, для складання оглядових гляціологічних карт.

Проте роль супутникових знімків не обмежується фіксацією просторового стану і морфології поверхні льодовиків. Важливим напрямком є застосування МДЗ для розрахунку низки режимних параметрів гляціологічних об'єктів. Вирішальне значення для цього має зображення на знімках границі живлення (фірнової лінії наприкінці періоду абляції), де накопичення снігу за рік дорівнює його витратам. Визначивши висоту межі живлення, розраховують для неї середню літню температуру повітря, а за нею – величину танення, яка на цій висоті дорівнює акумуляції снігу. Таким чином, за допомогою супутникових знімків непрямо можна визначити поле акумуляції для крупних гірських систем, наприклад для Паміру [72].

Супутникові знімки використовуються і для вивчення покривного заледеніння, зокрема антарктичного. Спеціальні гляціологічні програми, наприклад європейська CryoSat, американська ICESat, передбачають використання радіоальтиметрії і лазерної альтиметрії для високоточного визначення висоти поверхні льодовикових щитів і її зміни.

Знімки також використовуються для моніторингу заледенінь та низки інших завдань.

Забруднення снігу і вміст в ньому води також призводять до змін відбивної здатності. При насиченні снігу водою відбиття ближнього і середнього ІЧ випромінювання різко знижується.

4.6.5. Спектральна відбивна здатність водних поверхонь

Закономірності поглинання і розсіювання світла для води підкоряються тому ж закону, що й для атмосфери. Водна товща послаблює яскравість, контраст і чіткість спостережуваних водних об'єктів. Інтенсивність сонячного ЕМВ, що проникає в воду, знижується, а спектральний склад змінюється. ІЧ випромінювання повністю поглинається поверхневими шарами води. Для прозорих вод, коли практично відсутні суспензії і фітопланктон, червоні промені проникають на глибину 10 м, жовті – до 20 м і тільки синьо-блакитні досягають глибини 50 м. Інтенсивність світла тут зменшується приблизно в 100 разів. Однак цим фактам суперечать численні твердження космонавтів про те, що з орбітальних висот вдається розгледіти великі океанічні хребти навіть на кілометрових глибинах.

Одним з пояснень цього феномену є те, що з космосу спостерігається не рельєф дна океану, а корелюючі з ним постійні зони перемішування теплих поверхневих і холодних глибинних вод, у яких змінюються фізичні і біологічні характеристики верхніх шарів океану, шорсткість його поверхні. Такі великомасштабні явища в океані й сприймає людське око з космічної орбіти.

Якщо розглянути спектральну картину взаємодії випромінювання з водною поверхнею, виявиться, що вода найбільш сильно поглинає випромінювання ІЧ і червоних довжин хвиль. Менше поглинання спостерігається на синіх і зелених довжинах хвиль, тому вода для людського ока має синьо-зелений колір.

Порівняно з рослинними покривами і ґрунтами, відбивна здатність водних поверхонь є відносно низькою. Якщо рослинний покрив може відбивати до 50 % падаючого випромінювання, а ґрунти – до 30–40 %, то частка випромінювання, відбитого водною поверхнею, не перевищує 10 %.

Вода відбиває ЕМВ видимого і близького ІЧ діапазонів. При довжинах хвиль більше 1200 мкм усе падаюче випромінювання поглинається. Декілька кривих для водних поверхонь наведені на рис. 4.33 свідчать, що найбільшу відбивну здатність має мутна водна поверхня, а пік відбиття водойм з інтенсивною рослинністю, що містить хлорофіл, припадає на зелену частину спектра.

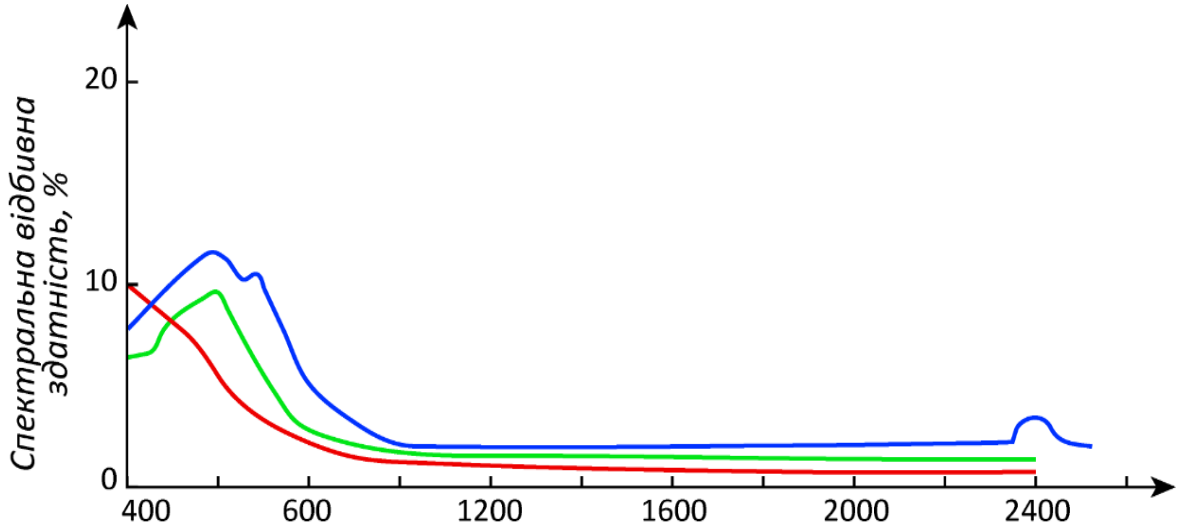


Рис. 4.33. *Криві спектральної відбивної здатності водної поверхні*

Відбивна здатність водних об’єктів дуже залежить від вмісту у воді фітопланктону і її забруднення – наявності зважених частинок, нафтової плівки тощо.

4.7. Простір спектральних ознак

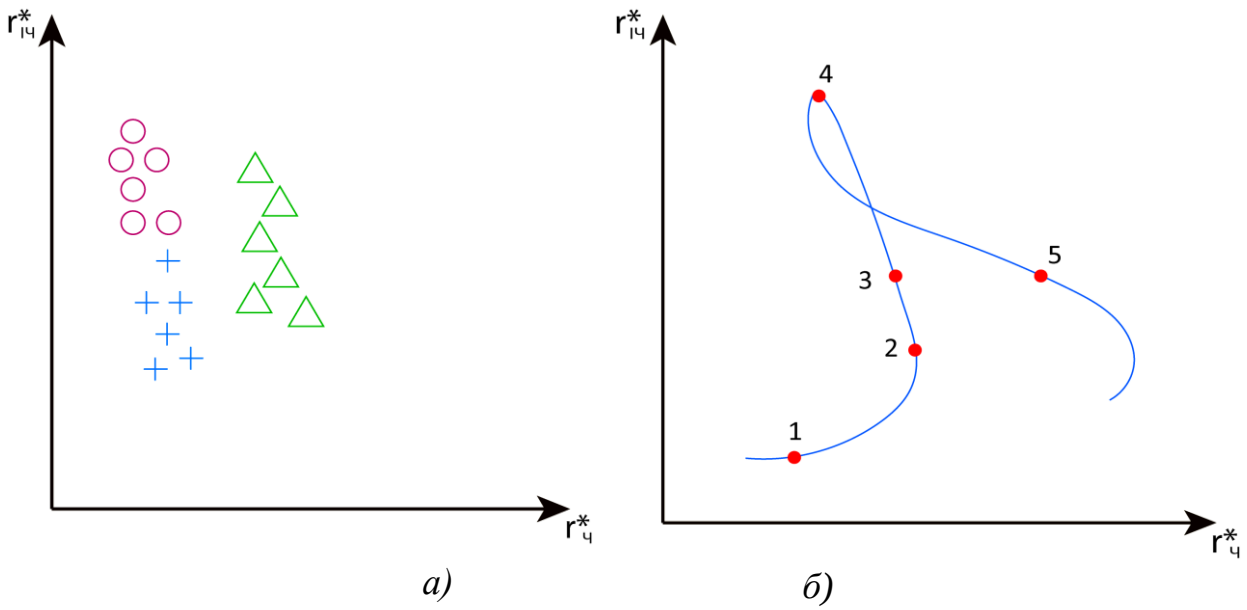
Крім подання коефіцієнтів r_λ у вигляді кривих спектральної яскравості, їх застосовують для характеристики об’єкта в так званому просторі *спектральних ознак*, подаючи графічно співвідношення спектральних яскравостей у найбільш інформативних зонах. Для цього значення яскравості (або КСЯ) в обраних зонах,

наприклад червоної і ближньої інфрачервоної, відкладають вздовж різних осей прямокутної системи координат на площині, яка в цьому випадку є двомірним простором спектральних ознак.

Положення отриманої точки, що визначається двома плоскими координатами, або, як кажуть, вектором, характеризує конкретний об'єкт або його стан. Оскільки спектральні яскравості одного і того ж об'єкта зазвичай варіюють у певних межах, то в просторі спектральних ознак такому об'єкту буде відповідати не одна точка, а ціла зона (рис. 4.34, *а*) [72].

Якщо ж при спостереженні об'єкта, що змінюється протягом певного часу, одержана серія значень спектральної яскравості, то їх набір дозволяє побудувати криву, форма якої в просторі спектральних ознак надійно ідентифікує об'єкт.

При дешифруванні знімків навіть виділяють особливу шифрувальну ознаку, яка називається *часовим образом об'єкта*. Наприклад, зміна спектральної яскравості сільськогосподарської культури протягом року ілюструє так звана крива її розвитку, тобто часовий образ культури (рис. 4.34, *б*).



а) *б)*

Рис. 4.34. *Простір спектральних ознак: а) подання трьох різних сільськогосподарських культур у двомірному просторі спектральних ознак за даними багаторазових вимірів; б) крива розвитку зернової культури в двомірному просторі спектральних ознак: 1 – ґрунт; 2 – сходи; 3 – колосіння, вихід в трубку; 4 – молочна стиглість; 5 – воскова стиглість;* $r^*_{ІЧ}$, $r^*_{Ч}$ *– коефіцієнти спектральної яскравості відповідно у ближній інфрачервоній і червоних зонах спектра*

Загальне уявлення про простір ознак, який може бути багатомірним, є принципово важливим і широко використовується при комп'ютерній обробці знімків.

Широко застосовується також використання величин КСЯ для одержання інформаційних спектральних показників – так званих індексів – шляхом простих арифметичних обчислень. При цьому використовується різниця або відношення двох коефіцієнтів, відношення їх різниці до суми тощо. Запропонована достатньо велика кількість таких показників (табл. 4.2) [7, с. 33].

Таблиця 4.2

Індекси, що розраховуються за значеннями коефіцієнтів відбиття в широких спектральних діапазонах

Типи вегетаційного індексу (BI)	Формула і стислий опис	Автори
1	2	3
Відносний BI (Ratio VI, RVI, Simple Ratio (SR))	$RVI = \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \right).$ Значення індексу змінюються від 0 до нескінченності. Для зеленої рослинності значення VI > 1 і зростають зі збільшенням зеленої фітомаси, зімкнутості рослинності (зазвичай набуваютьзначення 2–8)	Birth і McVey, 1968; Jordan C. F., 1969; Rouse J. W. та ін., 1973; Tucker C. J. та ін., 1979
Нормалізований вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)	$NDVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right).$ Індекс може набувати значення від –1 до 1. Для рослинності індекс NDVI набуває позитивні значення, зазвичай від 0,2 до 0,8	Вперше описаний Rouse B. J. та ін., 1973, концепція вперше подана Kriegler F. J. та ін., 1969
Удосконалений вегетаційний індекс (Enhanced Vegetation Index, EVI)	$EVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 \cdot \rho_{RED} - C_2 \cdot \rho_{BLUE} + L} \right) \cdot (1 + L) \cdot$ Коефіцієнти C_1, C_2 і L емпірично встановлені і які дорівнюють 6,0, 7,5 і 1,0 відповідно (Huete та ін., 1997). Індекс може приймати значення від –1 до 1. Для зеленої рослинності звичайні значення від 0,2 до 0,8	Rouse J. W. та ін., 1973; Tucker C. J., 1979; Jackson R. D. та ін., 1983; Kriegler F. J. та ін., 1969; Sellers P. J., 1985; Huete A. R. та ін., 1997
Інфрачервоний вегетаційний індекс (Infrared Percentage VI, IPVI)	$IPVI = \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right) = \left(\frac{NDVI + 1}{2} \right).$ Функціонально IPVI і NDVI еквівалентні. Індекс може приймати значення від 0 до 1. Для зеленої рослинності характерні значення від 0,6 до 0,9	Crippen R. E., 1990
Різницевий вегетаційний індекс (Difference VI, DVI)	$DVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED})$ Індекс може набувати будь-яких значень. Ізовегетаційні лінії йдуть паралельно одна одній	Lillesand T. M. і Kiefer R. W., 1987; Richardson і Everitt, 1992
Перпендикулярний вегетаційний індекс (Perpendicular Vegetation Index (PVI))	$PVI = (\sin(\alpha) \cdot \rho_{NIR} - \cos(\alpha) \cdot \rho_{RED}),$ де α – кут між ґрунтовою лінією і віссю NIR. Індекс може набувати значень від –1 до 1. $PVI = \sqrt{(0{,}35 \cdot MSS_4 - 0{,}149 \cdot MSS_2)^2 + (0{,}355 \cdot MSS_2 - 0{,}0852 \cdot MSS_4)^2}.$	Richardson A. J. і Wiegand C. L., 1977

Продовження таблиці 4.2

1	2	3
Зважений різницевий вегетаційний індекс (Weighted Difference VI, WDVI)	$WDVI = (\rho_{NIR} - g \cdot \rho_{RED})$, де g – нахил ґрунтової лінії. Зв'язаний з PVI приблизно так само, як IPVI зв'язаний з NDVI. WDVI – це математично більш простий варіант PVI, але він має необмежений діапазон значень. Як і PVI, WDVI дуже чутливий до атмосферного впливу (Qi та ін., 1994)	Clevers J. G., 1988
Трансформований вегетаційний індекс (Transformed Vegetation Index TVI)	$TVI = \sqrt{NDVI + 0{,}5}$. 0,5 додається для виключення від'ємних значень під коренем. Функціонально TVI і NDVI еквівалентні	Tucker C. J. та ін., 1979
Індекси, стійкі до впливу ґрунту		
Ґрунтовий вегетаційний індекс (Soil Adjusted VI, SAVI)	$SAVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) \cdot (1 + L)$ де L = [0;1], L = 0 для дуже густого рослинного покриву, L = 1 для дуже розрідженого, найчастіше використовують значення L = 0,5 (Huete і Liu, 1994). Значення індексу змінюються від –1 до 1. Лінія ґрунтів проходить через точку 0	Huete A. R., 1988 Huete A. R. і Liu H., 1994, Qi J. та ін., 1994
Модифікований ґрунтовий вегетаційний індекс (Modified Soil Adjusted VI, MSAVI). Модифікований ґрунтовий вегетаційний індекс – 2 (Modified Soil Adjusted VI–2, MSAVI2)	$MSAVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) \cdot (1 + L)$, де L – 1-2·s·NDVI·WDVI; $MSAVI2 = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) \cdot (1 + L)$, $L = 1 - \left(\frac{2 \cdot \rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2 \cdot \rho_{NIR} + 1)^2 - 8 \cdot (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}}{2} \right) \cdot$ s – нахил ґрунтової лінії. MSAVI2 – це другий модифікований ґрунтовий індекс, як варіант MSAVI. Для розрахунку індексу не потрібне знаходження ґрунтової лінії і обчислення WDVI, NDVI. Значення індексу змінюються від –1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил і проходить крізь точку 0	Qi J. та ін., 1994

Продовження таблиці 4.2

1	2	3
Трансформований ґрунтовий вегетаційний індекс (Transformed Soil Adjusted VI, TSAVI)	$$TSAVI = \left(\frac{s \cdot (\rho_{NIR} - s \cdot \rho_{RED} - a}{a \cdot \rho_{NIR} + \rho_{RED} - a \cdot s + x(1+s^2)} \right),$$ де a – координата перетинання ґрунтової лінії з віссю NIR (лежить між точкою 0;0 і точкою перетинання ізовегетаційних ліній в індексі SAVI для L = 0,5); s – нахил ґрунтової лінії, X – коефіцієнт корегування, для зменшення ґрунтового шуму (в оригінальній статті X = 0,08). Значення індексу змінюються від –1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил	Baret F. та ін., 1989; Baret F. і Guyot G., 1991
Індекси, стійкі до впливу атмосфери		
Вегетаційний індекс, стійкий до впливу атмосфери (Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI)	$$ARVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - Rb}{\rho_{NIR} + Rb} \right),$$ де $Rb = \rho_{RED} - a \cdot (\rho_{RED} - \rho_{BLUE})$. Зазвичай a = 1, при малому покритті рослинності і невідомому типу атмосфери a = 0,5 (Kaufman Y. J., 1992) Він використовує значення відбиття в синій зоні, щоб усунути вплив атмосфери на коефіцієнти відбиття у червоній зоні. Значення індексу змінюються від –1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил і проходить через точку 0	Kaufman, Y. J., Tanre D., 1992; Kaufman, Y. J. і Tanre D., 1996; Huete A. R. і Liu H., 1994
Ґрунтовий вегетаційний індекс, стійкий до впливу атмосфери (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index (SARVI))	$$SARVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - p \cdot Rb}{\rho_{NIR} + p \cdot Rb} \right),$$ $$p \cdot Rb = \rho_{RED} - \gamma(\rho_{BLUE} - \rho_{RED}).$$ Huete and Liu (1994) також запропонували провести таку заміну і в індексі SAVI, що отримав назву індекс SARVI (атмосферостійкий скорегований ґрунтовий вегетаційний індекс)	Huete A. R. і Liu H., 1994

Продовження таблиці 4.2

1	2	3
Вегетаційний індекс зеленості (Green VI, GVI)	Існує декілька GVI. В їх основі лежить використання двох або більше ділянок відкритого ґрунту для побудови ґрунтової лінії, потім використовується ортогоналізація Грама Шмідта (Gram-Schmidt orthogonalization) для знаходження "зеленої" лінії ("greenness" line), яка проходить крізь точку найбільш густого рослинного покриву і перпендикулярна ґрунтовій лінії. $GVI = -0{,}29 \cdot MSS_4 - 0{,}56 \cdot MSS_5 + 0{,}6 \cdot MSS_6 + 0{,}49 \cdot MSS_7$; $GVI = -0{,}2848 \cdot TM_1 - 0{,}2435 \cdot TM_2 - 0{,}5436 \cdot TM_3 + 0{,}7243 \cdot TM_4 + 0{,}084 \cdot TM_5 - 0{,}18 \cdot TM_7$, де MSS_n – яскравість в n зоні системи MSS, аналогічно для TM. Значення індексу змінюються від –1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил в n-мірному просторі. Ізовегетаційні лінії паралельні ґрунтовій лінії	Kauth R.G. і Thomas G. S., 1976 розробили 4-канальний варіант індексу для знімків MSS. Crist E. P. і Cicone R. C., 1984 створили 6-канальний варіант для знімків TM. Jackson R. D., 1983 описав, як створити n-канальну версію
Індекси, що розраховуються за значеннями коефіцієнтів відбиття у вузьких спектральних діапазонах*		
Нормалізований різницевий ВІ для зони БІЧ схилу (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI_{0,705} = \left(\frac{\rho_{0,75} - \rho_{0,705}}{\rho_{0,75} + \rho_{0,705}} \right)$. Індекс може набувати значення від –1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай набуває значення від 0,2 до 0,9	Gitelson A. A. та ін., 1994 Sims D. A. та ін., 2002
Модифікований відносний ВІ для області ближнього інфрачервоного схилу (Modified Red Edge Simple Ratio Index)	$mSR_{0,705} = \left(\frac{\rho_{0,75} - \rho_{0,445}}{\rho_{0,75} + \rho_{0,445}} \right)$. Індекс може набувати значення від 0 до 30. Для зеленої рослинності зазвичай набуває значення від 2 до 8	Datt B., 1999 Sims D. A. та ін., 2002
Модифікований нормалізований різницевий ВІ для області ближнього інфрачервоного схилу (Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)	$mNDVI_{0,705} = \left(\frac{\rho_{0,75} - \rho_{0,705}}{\rho_{0,75} + \rho_{0,705} - 2 \cdot \rho_{0,445}} \right)$. Індекс може набувати значення від –1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай набуває значення від 0,2 до 0,7	Datt B., 1999 Sims D. A. та ін., 2002

Продовження таблиці4.2

1	2	3
1, 2, 3 індекси Вогельмана для зони БІЧ схилу (Vogelmann Red Edge Index 1, Index 2, Index 3)	$VOG1 = \left(\frac{\rho_{0,74}}{\rho_{0,72}}\right)$; $VOG2 = \left(\frac{\rho_{0,734} - \rho_{0,747}}{\rho_{0,715} + \rho_{0,726}}\right)$; $VOG3 = \left(\frac{\rho_{0,734} - \rho_{0,747}}{\rho_{0,715} + \rho_{0,720}}\right)$. Індекс може набувати значення від 0 до 20. Для зеленої рослинності зазвичай набуває значення від 4 до 8	Vogelmann J. E. та ін., 1993
Індекси для оцінки вмісту вологи у рослинному покриві Для розрахунків цих індексів використовуються значення відбиття у ближній інфрачервоній і середній інфрачервоній зонах спектра		
Водний індекс (Water Band Index, WBI)	$WBI = \left(\frac{\rho_{0,900}}{\rho_{0,970}}\right)$. Зелена рослинність зазвичай має значення від 0,8 до 1,2. Збільшення вмісту води у рослинах призводить до збільшення поглинання в зоні близько 0,970 мкм відносно поглинання в зоні близько 0,9 мкм. Даний індекс застосовується для аналізу водного стресу, визначення продуктивності, аналізу пожежонебезпеки, управління зрошуваними землями тощо	Penuelas J. I. та ін., 1995 Champagne C. та ін., 2001
Нормалізований різницевий водний індекс (Normalized Difference Water Index, NDWI)	$NDWI = \left(\frac{\rho_{0,857} - \rho_{1,241}}{\rho_{0,857} + \rho_{1,241}}\right)$. Індекс може набувати значення від –1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай набуває значення від –0,1 до 0,4	Gao B. C., 1995
Індекс стресу вологості (Moisture Stress Index, MSI)	$MSI = \left(\frac{\rho_{1.599}}{\rho_{1,819}}\right)$; $MSI = \frac{TM_5}{TM_4}$ Індекс може приймати значення від 0 до >3. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від 0,04 до 2. Вміст води в листі призводить до збільшення поглинання в зоні близько 1,599 мкм. Поглинання в зоні 0,819 мкм майже не змінюється залежно від вмісту води	Rock та ін., 1986 Hunt Jr. та ін., 1989 Ceccato P. та ін., 2001
Нормалізований різницевий інфрачервоний індекс (Normalized Difference Infrared Index, NDII)	$NDII = \left(\frac{\rho_{0,819} - \rho_{1,649}}{\rho_{0,819} + \rho_{1,649}}\right)$ Індекс може набувати значення від –1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай набуває значення від 0,02 до 0,6	Hardisky M. A. та ін., 1983 Jackson T. L. та ін., 2004

* Індекси цієї групи також відображують загальну кількість і стан рослинності. Ці індекси використовують для розрахунків даних про яскравість на ділянці спектра від 690 до 740 нм, тобто розглядають область інфрачервоного схилу (red edge).

Питання для самоконтролю

1. *Що розуміють під підстильною поверхнею?*
2. *Як взаємодіє сонячне випромінювання з підстильною поверхнею?*
3. *Що розуміють під інтегральною яскравістю?*
4. *Що розуміють під коефіцієнтом інтегральної (ахроматичної) яскравості?*
5. *Що розуміють під коефіцієнтом спектральної яскравості?*
6. *Що розуміють під контрастом яскравості?*
7. *Що розуміють під індикатрисою відбиття?*
8. *Що розуміють під простором спектральних ознак?*
9. *Дайте характеристику відбивної здатності рослинності.*
10. *Дайте характеристику відбивної здатності снігового покриву.*
11. *Дайте характеристику відбивної здатності ґрунтів.*
12. *Дайте характеристику відбивної здатності водних поверхонь.*

V. ВЛАСНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗЕМЛІ

Сонце безперервно випромінює ЕМХ у всіх напрямках. Ці хвилі досягають атмосфери Землі, де зазнають трансформації (частково відбиваються, частково поглинаються атмосферою, а решта надходить до поверхні Землі), де знову зазнають трансформації.

Поглинена поверхнею Землі та інших об'єктів на ній енергія Сонця йде на підвищення температури. Оскільки порівняно з температурою Сонця температура Землі є низькою, то випромінювана нею енергія припадає переважно на невидиму інфрачервону (довгохвильову) ділянку спектра. Це випромінювання відіграє дуже важливу роль в енергетичному балансі Землі, забезпечуючи підтримання стабільної середньої температури. Одиницею виміру енергії, що використовується для виміру цього вхідного і вихідного випромінювання, є вати на квадратний метр (Вт/м^2).

Земну поверхню як об'єкт випромінювання не можна розглядати як абсолютно чорне тіло. Проте дослідження спектрів довгохвильової радіації різних поверхонь засвідчило, що її з достатнім ступенем точності можна вважати сірим тілом.

Планетарне альбедо Землі – відношення випроміненої в космос відбитої і розсіяної сонячної радіації до кількості сонячної радіації, що надходить до атмосфери, становить трохи більше 30 %. Воно складається з випромінювання, відбитого від атмосфери (21 %), від земної поверхні (3 %), і розсіяної радіації (6 %).

5.1. Характеристики власного випромінювання Землі

Сонячне випромінювання – це короткохвильове високоенергетичне випромінювання, при поглинанні якого відбувається підвищення температури поверхні землі, повітря або води.

Власне випромінювання Землі виникає в результаті поглинання Землею сонячного випромінювання і наступного його перевипромінювання. Оскільки Земля значно холодніша від Сонця, вона випромінює (перевипромінює) енергію у вигляді хвиль великої довжини з набагато меншою енергією, чим поглинає. Ця поглинена енергія перевипромінюється у вигляді інфрачервоного випромінювання, яке людина відчуває, як тепло.

Випромінювання Землі (англ. *eradiation of Earth, emanation of Earth; нім. Erdeausstrahlung, Erdestrahlung*) **– *промениста енергія, що випромінюється планетою у навколишній простір.***

Випромінювання тепла від поверхні Землі до атмосфери означає, що Земля тепліша за атмосферу.

Випромінювання Землі відіграє дуже важливу роль в енергетичному балансі Землі і регулюванні температури планети.

Характеристики власного випромінювання Землі подано на рис. 5.1.

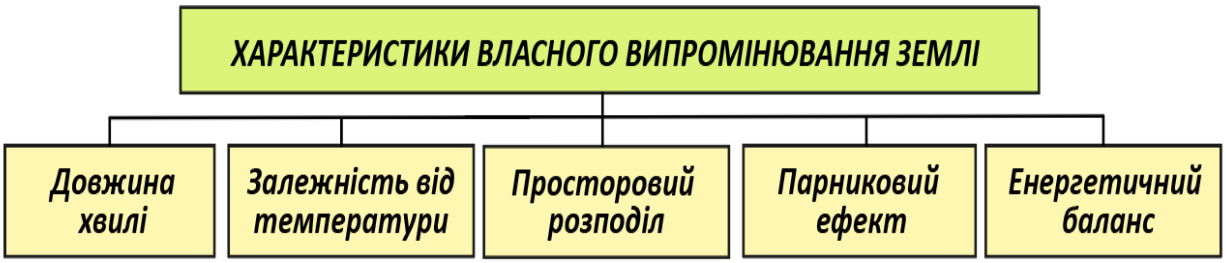


Рис. 5.1. *Характеристики власного випромінювання Землі*

Довжина хвилі. Випромінювання Землі є головним чином довгохвильовим інфрачервоним випромінюванням з довжинами хвиль від 4 до 30 мкм. Це контрастує з більш короткими довжинами хвиль сонячного випромінювання, передусім з випромінюванням видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів.

Залежність від температури. Довжина хвилі випромінювання прямо пропорційна температурі об'єкта випромінювання. Оскільки поверхня й атмосфера Землі істотно холодніша від Сонця, то вони випромінюють більш довгі хвилі.

Парниковий ефект. Парникові гази в атмосфері (передусім водяна пара, вуглекислий газ та метан) поглинають значну частину випромінювання Землі. Це спричинює утримання тепла та нагрів планети, тобто виникнення парникового ефекту.

Енергетичний баланс. Енергетичний баланс Землі визначається балансом між сонячним випромінюванням, що надходить, і вихідним сонячним випромінюванням. Деяка частина сонячного випромінювання відбивається назад в космос, а сонячна енергія, що була поглинена, випромінюється у вигляді довгохвильового випромінювання. Парниковий ефект впливає на цей баланс, уловлюючи частину випромінювання Землі.

Просторовий розподіл. Інтенсивність випромінювання Землі варіюється по всій земній кулі через такі чинники, як температура поверхні та склад атмосфери. Наприклад, полярні регіони одержують менше випромінювання, на відміну від тропічних, через більш низькі температури. По суті, випромінювання Землі – це інфрачервона енергія, яку вона випромінює після поглинання сонячної енергії і є фундаментальним фактором регулювання температури планети за допомогою парникового ефекту.

Земля, як і будь-яке тіло з температурою, відмінною від абсолютного нуля, є джерелом ЕМВ у всьому діапазоні спектра, проте розподіл енергії по спектру нерівномірний і визначається законом Планка, а також залежить від так званої випромінювальної здатності (рис. 5.2).

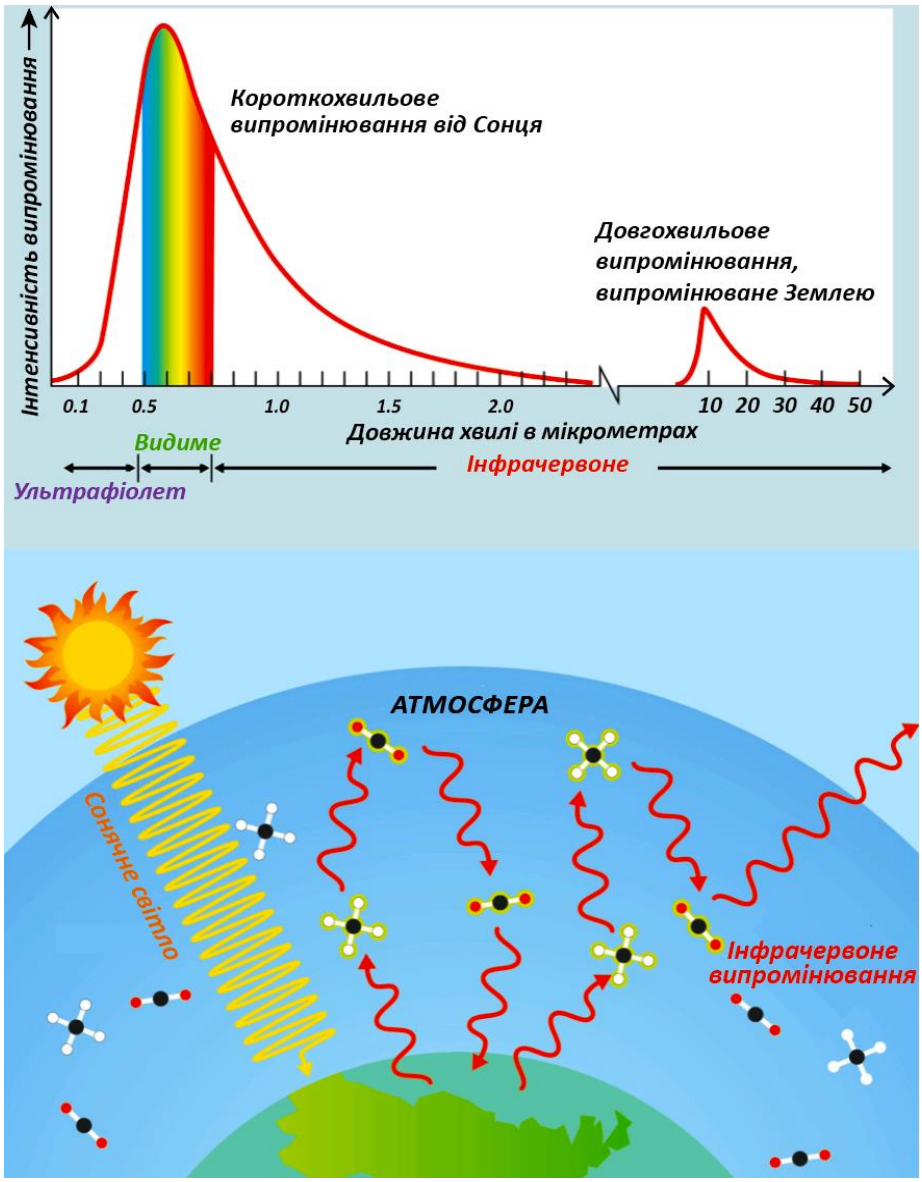


Рис. 5.2. *Графічна ілюстрація випромінювання Землі*

5.2. Рівняння теплового балансу (радіаційної рівноваги)

Розмірковуючи, чому середня температура Землі становить приблизно 15°C, Жозеф Фур'є, французький математик і фізик, у 1827 р. прийшов до висновку, що для підтримки цієї постійної температури, має бути певний баланс між енергією, що надходить на Землю, та енергією, що випромінюється нею. Щоб забезпечити середню температуру 15°C, повинен відбуватися процес, аналогічний тому, що відбувається в теплиці. Скляний корпус теплиці пропускає видиме світло та поглинається рослинами та ґрунтом. Рослини та ґрунт потім випромінюють поглинену теплову енергію у вигляді інфрачервоного випромінювання. Далі скло теплиці поглинає це інфрачервоне випромінювання, випромінюючи частину його назад у теплицю, зберігаючи теплицю теплою, навіть коли температура ззовні нижча. Оскільки процеси випромінювання теплиці і поверхні Землі схожі, Фур'є запропонував назву "парниковий ефект".

Рівняння теплового балансу, також відоме як рівняння радіаційної рівноваги, описує баланс між надходженням та втратою тепла тілом або системою тіл.

Тепловий баланс земної поверхні – алгебраїчна сума потоків тепла, що надходять на земну поверхню і йдуть від неї.

Тепловий баланс земної поверхні можна виразити рівнянням:

$$R_n+L_E+H+G=0,$$

де: R_n – радіаційний баланс земної поверхні, який характеризує випромінювання, що йде від Сонця й атмосфери до поверхні Землі, без відбитого та емітерного (вторинного теплового) потоків від неї;

L_E – прихований, латентний потік тепла, що витрачається на дихання рослин, випаровування вологи та на утворення роси;

H – потік чутливого (сенсибельного) тепла, що передається між поверхнею Землі та прилеглим до неї шаром повітря;

G – тепловий турбулентний потік, що йде з глибини крізь ґрунт до її поверхні або води і назад.

Вдень тепловий баланс R_n містить значну компоненту, що вирівнює контрасти й енергетичні джерела процесів. Велика частина тепла витрачається на евапотранспірацію (транспірування рослин та випаровування з поверхні ґрунту) і на розігрівання повітря. Тільки незначна частина його (близько 10–30 %) йде на розігрівання ґрунтів. Вночі енергетичний вплив рослин і атмосфери істотно зменшується. В цей час спрямований угору тепловий потік можна розглядати як теплове випромінювання природних об’єктів на поверхні Землі і використовувати його для дистанційного зондування [72].

Порушення теплового балансу може спричинити як глобальне потепління, так і глобальне похолодання.

Відомості про випромінювання Землею дають змогу визначити термічний режим окремих частин Землі. На рис. 5.3 подано зображення кривих випромінювання природних тіл з різними температурами – від Сонця до зрідженого повітря [2; 96].

Сонце діє як абсолютно чорне тіло, що має температуру близько 6000 К, а земна поверхня – як сіре тіло з температурою близько 300 К (17 ºС).

Відповідно до температури Землі максимум енергії земного випромінювання припадає на інфрачервоні промені з довжинами хвиль 9–12 мкм (+50…–50 С).

В аномально нагрітих тіл максимум випромінювання зміщений на довжини хвиль 5–7 мкм.

При зміщенні в бік більш коротких інфрачервоних хвиль земне теплове випромінювання слабшає і при довжині хвилі 3 мкм має інтенсивність, приблизно однакову з інфрачервоним сонячним випромінюванням. У бік довгих хвиль воно поширюється на радіодіапазон, і його вдається реєструвати навіть на метрових радіохвилях.

Оскільки земна поверхня має порівняно низьку температуру, вона випромінює ЕМХ завдовжки від 3 до 80 мкм, що відносяться до інфрачервоного діапазону спектра і не сприймаються людським оком.

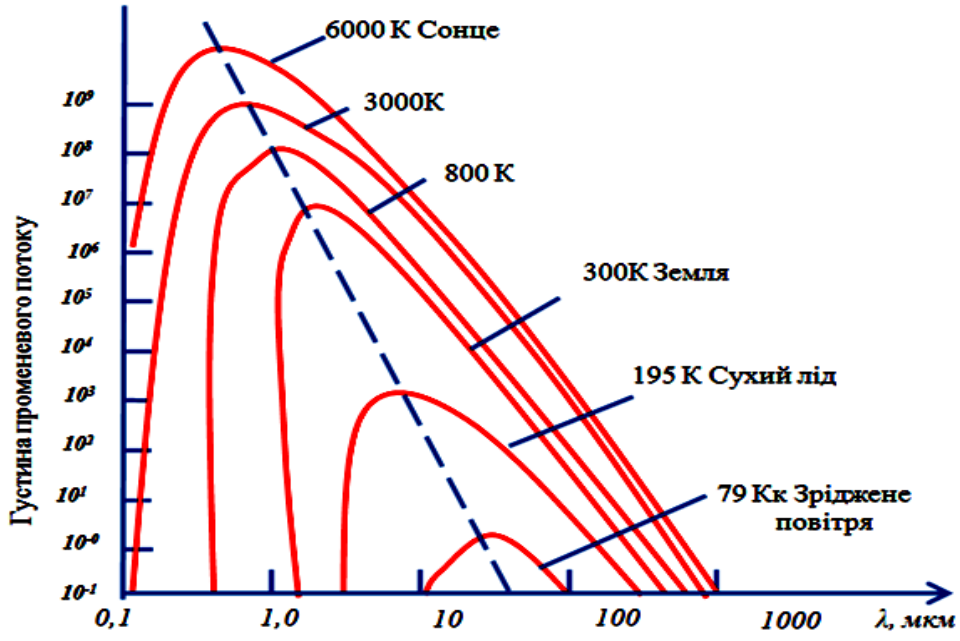


Рис. 5.3. *Залежність густини потоку ЕМХ, яке випромінює абсолютно чорне тіло, від температури та його аналоги з природними об'єктами* [2; 96]

За рахунок власного випромінювання земна поверхня, втрачаючи тепло, охолоджується.

Потік власного випромінювання земної поверхні спрямований вгору і майже повністю поглинається атмосферою, нагріваючи її. В свою чергу атмосфера посилає до земної поверхні своє зустрічне випромінювання (противипромінювання атмосфери) приблизно з тими ж довжинами хвиль, які частково компенсують втрату тепла земною поверхнею за рахунок власного випромінювання.

Різниця між власним випромінюванням земної поверхні і зустрічним випромінюванням називається *ефективним випромінюванням*.

У ясні ночі противипромінювання зменшується й ефективне випромінювання збільшується; тому земна поверхня сильно охолоджується, а від неї охолоджуються й нижні шари повітря. При цьому можуть виникнути туман або роса, а навесні і восени – заморозки. В хмарні ночі, навпаки, зустрічне випромінювання збільшується за рахунок випромінювання хмар, а ефективне випромінювання та охолодження земної поверхні зменшене. Вдень, крім противипромінювання, земна поверхня отримує ще й сонячну радіацію. Разом вони протягом більшої частини дня (в теплий час року в помірних широтах) перевищують земне випромінювання, і земна поверхня нагрівається.

Земна поверхня, поглинаючи сонячну енергію і нагріваючись, сама стає джерелом випромінювання тепла в атмосферу. На відміну від короткохвильового сонячного (прямого і розсіяного) та відбитого випромінювання, власне випромінювання земної поверхні за своєю природою довгохвильове, теплове, спрямоване головним чином в атмосферу.

Випромінювання, що йде від Землі, як і випромінювання техногенного походження, можна умовно розділити на *інфрачервоне* і *радіотеплове*.

5.3. Інфрачервоне випромінювання Землі

Як відомо, поверхня Землі, як і Сонце, поводяться як чорні тіла (тіла, які поглинають та випромінюють зі 100 % ефективністю). З цієї причини для пояснення кореляції між температурою та випромінюванням Сонця та Землі можна використовувати закони Стефана-Больцмана та Віна.

Все, що має температуру, випромінює електромагнітне випромінювання. Земля, будучи холоднішою за Сонце, випромінює інфрачервоне випромінювання з довшими хвилями.

Залежність інтенсивності інфрачервоного випромінювання від температури об'єктів лежить в основі дистанційних методів її визначення (теплова зйомка).

Для реєстрації інфрачервоного теплового випромінювання на даний час використовуються два діапазони спектра: 3–5 мкм і 8–12 мкм. Відповідно до фізичного закону Стефана-Больцмана, інтенсивність теплового випромінювання P земних об'єктів різко зростає з підвищенням їх абсолютної температури T:

$$P = \varepsilon \sigma T^4,$$

де σ – фундаментальна постійна Стефана, значення якої є точно відомим;
ε – коефіцієнт випромінювання конкретного об'єкта, величина якого відрізняється для різних довжин хвиль, визначається експериментально.

Формула Стефана-Больцмана дозволяє дистанційно вимірювати температуру об'єктів.

Земне випромінювання, поширюючись у напрямку більш коротких інфрачервоних хвиль, стає більш слабким і при довжині хвилі 3 мкм має інтенсивність приблизно однакову з інфрачервоним сонячним випромінюванням. У напрямку довгих хвиль воно поширюється на радіодіапазон, і його вдається реєструвати навіть на метрових радіохвилях.

У діапазоні 3,0–80 мкм зосереджено близько 99 % теплового випромінювання земної поверхні. Спектр випромінювання поверхні Землі вдень має два максимуми – один на довжині хвилі близько 0,5 мкм, який обумовлюється відбитим сонячним випромінюванням, і другий – на довжині хвилі близько 10–12 мкм, обумовлений власним тепловим випромінюванням (рис. 5.4).

Остання зона більш інформативна, проте відсутність чутливих приймачів приводить до зменшення розрізненності в цій зоні.

Вночі спектр випромінювання земної поверхні змінюється, зберігається тільки максимум у діапазоні власного випромінювання, а в діапазоні відбиття максимум зникає (рис. 5.5).

Залежно від того, який закон теплового випромінювання використовується при вимірюванні температури тіл, розрізняють *радіаційну*, *колірну* і *яскравісну* температури.

Радіаційна температура – умовна температура тіла, що чисельно дорівнює такій температурі абсолютно чорного тіла, за якої інтегральні енергетичні яскравості обох тіл є рівні [12].

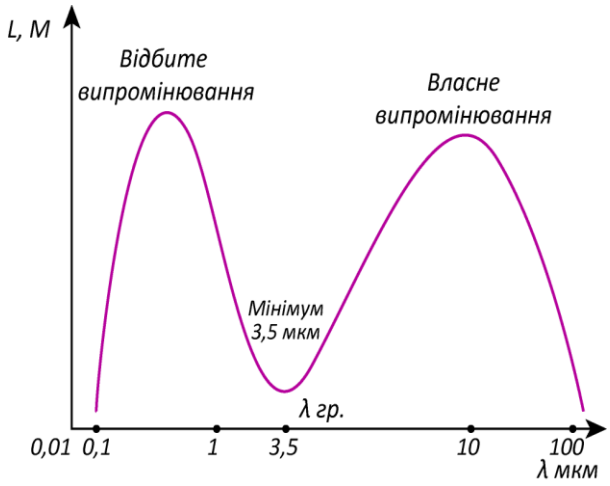


Рис. 5.4. *Спектральне відбиття і власне випромінювання поверхні Землі вдень*

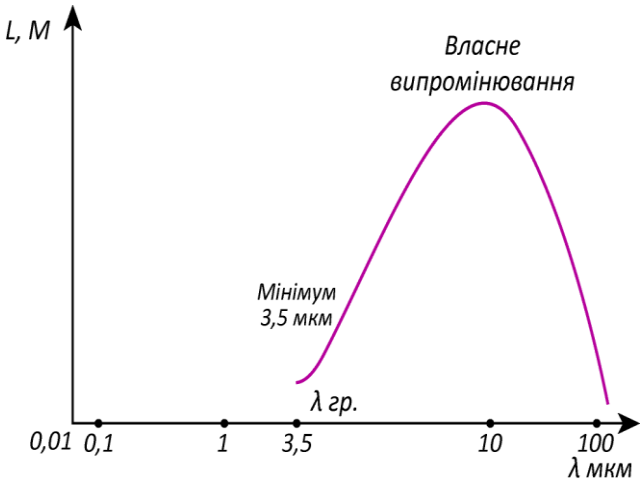


Рис. 5.5. *Спектральне відбиття випромінювання поверхні Землі вночі*

Радіаційна температура – це така температура чорного тіла, за якої його енергетична світність R дорівнює енергетичній світності R_T досліджуваного тіла:

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{R_T}{\sigma}} \ .$$

Радіаційна температура зазвичай нижче від фізичної, оскільки вона залежить ще й від випромінювальної здатності об'єкта та від ослаблення випромінювання в атмосфері. Проте навіть у випадку реєстрації не абсолютних температур, а тільки температурних (радіаційних) контрастів можливе ефективне виділення об'єктів і визначення їх характеристик. За температурними контрастами зазвичай виділяють вулкани, течії в океані, виявляють зони підземних пожеж, контролюють стан енергетичних та іригаційних систем тощо [72].

Реєстрація власного випромінювання здійснюється спеціальними скануючими системами або інфрачервоними радіометрами. Прикладами успішної інфрачервоної індикації можуть слугувати виявлення пожеж та дослідження геотермальних процесів. Інфрачервоні датчики, що встановлюються на супутниках, здатні фіксувати різницю поверхневих температур між окремими ділянками ґрунтів. На підставі таких даних можлива швидка і точна диференціація ділянок ґрунту з різною вологістю і механічним складом на великих територіях.

У багатьох об’єктів зранку і ввечері спостерігається явище *інверсії температурних контрастів*.

$$T_к = \frac{b}{\lambda_{max}}.$$

Максимальні температурні контрасти об’єктів, що нагріваються Сонцем, спостерігаються опівдні: вони менші ввечері і суттєво згладжуються вночі, досягаючи мінімуму в передранкові години. Наприклад, поверхневі води вночі тепліші, а вдень холодніші від навколишнього суходолу; у денні часи хвойна рослинність холодніша від листяної, а в нічні – навпаки. Великий вплив на температурні контрасти здійснює вологість поверхні у зв’язку з її охолодженням при випаровуванні. Так, у ранкові часи добре виділяються холодні зволожені ділянки місцевості. Однією з причин температурних контрастів є конвективний тепловий потік з надр Землі, який нерідко пов’язаний із тектонічними порушеннями [72].

Крім того, різна залежність випромінювальної здатності різних об’єктів відкриває можливості їх ідентифікації (рис. 5.6).

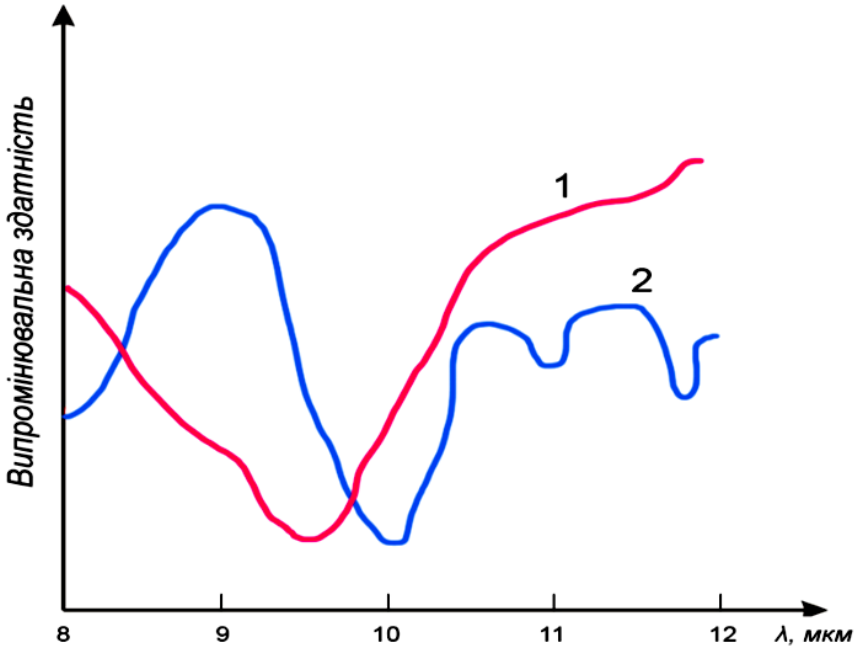


Рис. 5.6. *Спектральна випромінювальна здатність деяких гірських порід: 1 – піщаник; 2 – базальт*

Колір абсолютно чорного тіла залежно від температури нагрівання подано на рис. 5.7. Колір змінюється від чорного до червоного, потім жовтого, білого, і, нарешті, синюватого, у міру підвищення температури. Це пов’язано з тим, що при нагріванні змінюється спектр випромінювання, і світло, що випромінюється тілом, переміщується в більш короткохвильову зону спектра.

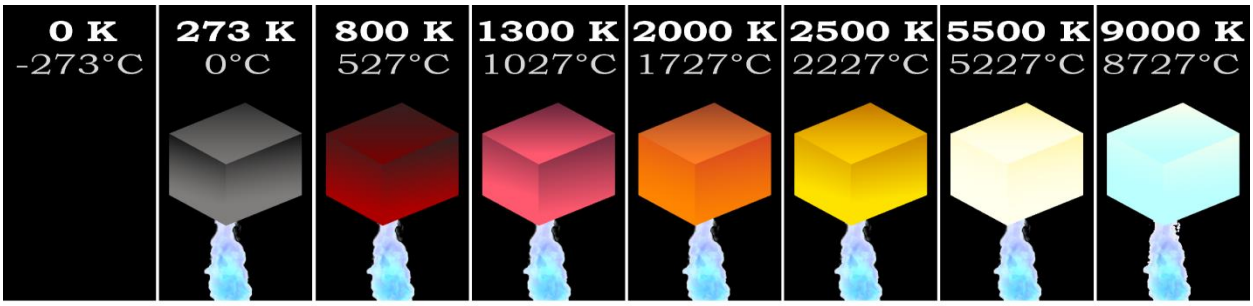


Рис. 5.7. *Колір абсолютно чорного тіла залежно від температури нагрівання*

Яскравісна температура – це фотометрична величина, яка характеризує інтенсивність випромінювання і не є температурою в звичному розумінні. Вона відображає не тепловий стан об'єкта, як це робить звичайна температура, а вказує на те, наскільки яскраво випромінює джерело в певному діапазоні.

Яскравісна температура – це температура T_b в діапазоні частот $\Delta\nu$, яка відповідає температурі абсолютно чорного тіла, що має таку саму інтенсивність у даному діапазоні частот:

$$T_b = \frac{hc}{k\lambda} \cdot \frac{1}{\ln\left(1 + \dfrac{2hc^2}{I_\lambda \cdot \lambda^5}\right)},$$

де λ – довжина світла;
c – швидкість світла;
k – постійна Больцмана;
h – постійна Планка.

5.4. Радіотеплове випромінювання Землі

Як уже зазначалось, нагріті об'єкти випромінюють енергію і в радіодіапазоні, хоча радіотеплове випромінювання за інтенсивністю значно поступається тепловому випромінюванню в ІЧ діапазоні. Радіотеплове випромінювання, як і інфратеплове, формується поверхневим випромінювальним шаром, який називається *скін-шаром*, потужність якого тим більша, чим довша хвиля випромінювання.

При розгляді теплового випромінювання важливими є уявлення про ідеальний випромінювач (еталон), за який приймається абсолютно чорне тіло. Серед об'єктів з однаковою температурою власне випромінювання ідеального випромінювача буде найбільш інтенсивним. Тому, якщо прийняти коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла за одиницю, то в інших об'єктів він буде менший [72], що подано в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Коефіцієнти випромінювання деяких об'єктів
(інфрачервоний діапазон 8–14 мкм)

Об'єкт	ε	Об'єкт	ε
Вода чиста	0,099	Кварц (агат)	0,93
Льоди	0,98	Граніт	0,9
Рослинність	0,97	Базальт	0,81
Асфальт	0,96	Пісок кварцовий	0,71

Коефіцієнти випромінювання (ε) характеризують здатність тіла випромінювати енергію в конкретному діапазоні довжин хвиль. Вони коливаються від 0 до 1. Чим ближче значення ε до 1, тим краще тіло випромінює енергію, і навпаки. Абсолютно чорне тіло (ε=1) поглинає всю падаючу енергію і випромінює її максимально ефективно.

Інтенсивність радіотеплового випромінювання характеризується так званою радіояскравісною температурою $T_я$, що вимірюється в градусах Кельвіна – добутком абсолютної температури T_t і коефіцієнта випромінювання χ (закон Релея-Джинса):

$$T_я = \chi T_t .$$

Радіояскравісна температура реального об'єкта дорівнює абсолютній температурі абсолютно чорного тіла, що створює випромінювання такої ж потужності, як і даний об'єкт.

Коефіцієнт випромінювання, що є складовою у формулі радіояскравісної температури, для абсолютно чорного тіла дорівнює одиниці, а для інших реальних об'єктів він менший. Цей коефіцієнт, або, як кажуть, ступінь чорноти об'єкта, змінюється в широкому діапазоні, він залежить від електричних властивостей об'єкта, характеру його поверхні, довжини хвилі. Найменшу радіояскравісну температуру має вода (~100 К), найбільшу – рослинність (~300 К).

На радіояскравісну температуру акваторій суттєвий вплив здійснюють водні хвилі, які збільшують її яскравісну температуру, оскільки пористі пінисті гребені мають більш високий коефіцієнт випромінювання, на відміну від води. Радіояскравісна температура льоду зазвичай на декілька десятків градусів вища, ніж води, що пояснюється більш високим коефіцієнтом випромінювання льоду, причому випромінювальна здатність прісноводних льодів вища від морських. Випромінювальна здатність є різною в однорічного і багаторічного льоду.

Радіаційні характеристики ґрунтового покриву, крім температури, залежать від гранулометричного складу, розтинання поверхні, але найбільший вплив здійснює вологість ґрунтів. Перепад рівнів радіовипромінювання сухого ґрунту і ґрунту в стані повної вологоємності становить 50–100 К (рис. 5.8).

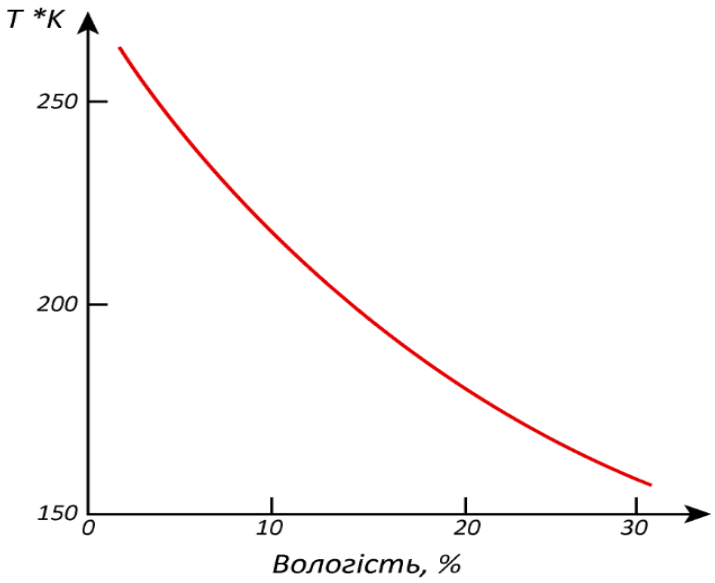


Рис. 5.8. *Залежність радіояскравісної температури ґрунту від вологості*

Випромінювання різних довжин хвиль несе інформацію про вологість ґрунту на різних глибинах.

За радіотепловим випромінюванням можна визначати вміст вологи поверхневого шару ґрунту завтовшки 1–2 дм.

Рослинний покрив у радіодіапазоні має найвищі випромінювальні властивості, що наближаються до властивостей ідеального випромінювача – абсолютно чорного тіла. Його радіояскравісна температура підвищується пропорційно висоті і густоті рослин.

Радіотеплове випромінювання ґрунтово-рослинного покриву різних природних зон (тайга, тундра, степ, пустеля) помітно відрізняються. Воно також має вразливий річний хід з максимумом у літній період.

Як свідчить досвід, радіотеплове випромінювання, що реєструється при різних довжинах хвиль, доцільно використовувати для характеристики цілком визначених об’єктів і явищ. Так, міліметрові хвилі найбільш придатні для дослідження атмосфери, сантиметрові – льодів, дециметрові – солоності водойм тощо.

Питання для самоконтролю

1. *Охарактеризуйте власне випромінювання Землі.*
2. *Охарактеризуйте інфрачервоне випромінювання Землі.*
3. *Що розуміють під радіаційною температурою?*
4. *Що розуміють під колірною температурою?*
5. *Що розуміють під яскравісною температурою?*
6. *Охарактеризуйте радіотеплове випромінювання.*

VI. МЕТОДИ ТА СПОСОБИ ОДЕРЖАННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ДЗЗ

Тільки тепер, з висоти прямолінійного польоту
ми відкриваємо істинну основу нашої Землі, фундамент із скель,
піску і солі, на якому, немов мох серед руїн, зацвітає життя.
Антуан де Сент-Екзюпері

Матеріали супутникової зйомки (МКЗ) є об'єктивним, актуальним і найбільшим джерелом фотограмметричної та семантичної інформації про стан поверхні Землі й об'єктів на ній. МКЗ формуються методами ДЗЗ в бортових сенсорах (системах реєстрації інформаційних електромагнітних полів) космічних апаратів, що рухаються навколо Землі згідно з законами небесної механіки на висотах від 200 км до 36 000 км.

6.1. Загальна характеристика методів ДЗЗ

Незважаючи на свою відносно нетривалу історію розвитку, ДЗЗ вже має багатий арсенал *методів одержання аерокосмічної інформації* або просто *методів ДЗЗ*.

Метод дистанційного зондування Землі – сукупність операцій з отримання даних про Землю за допомогою технічних засобів ДЗЗ [2].

Дистанційні методи ДЗЗ є багатоплановими дослідженнями Землі й навколоземного простору, що виконуються за матеріалами наземної, повітряної та космічної зйомок. Це безконтактні методи вивчення поверхні Землі, гідросфери, літосфери, атмосфери та космічних тіл.

Застосовуючи методи ДЗЗ, фахівці оцінюють природні умови й особливості території, вивчають динаміку різних процесів, досліджують площі, зайняті ріллею, лісами, водоймами, населеними пунктами, роблять оцінку і здійснюють моніторинг екологічного стану місцевості тощо. Важливою властивістю аеро- та супутникових знімків є комплексне відбиття одночасно всіх компонентів географічної оболонки, тому знімки є добрим підґрунтям комплексних досліджень.

Фізичною основою всіх дистанційних методів зондування є реєстрація на борту аерокосмічного носія спектральних яскравостей різних природних утворень, об'єктів та фонів.

Методи ДЗЗ поділяються на дві основні групи: *активні* й *пасивні*.

Кожному з цих методів відповідають певні види зйомок (рис. 6.1) [30].

При цьому сенсори в одних умовах можуть виступати як пасивні, а в інших – активними, наприклад, побутовий фотоапарат під час звичайної зйомки виступає як пасивний сенсор, а під час зйомки зі спалахом вже виступає як активний сенсор.

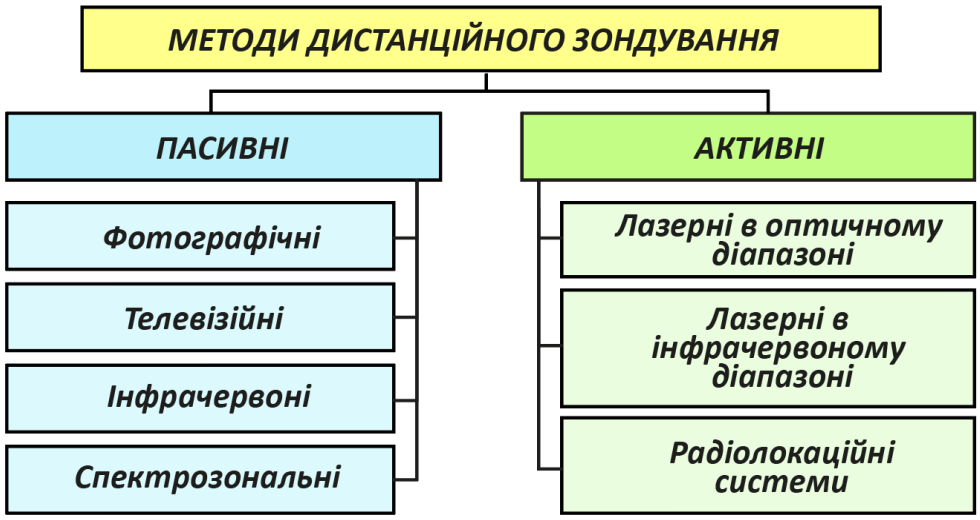


Рис. 6.1. *Методи дистанційного зондування*

Головними перевагами застосування методів ДЗЗ є, по-перше, *оглядовість*, тобто можливість одержання одночасної інформації про великі території, по-друге, *можливість переходу від дискретної картини значень показників стану навколишнього середовища в окремих пунктах території до безперервної картини просторового розподілу показників,* по-третє, *можливість отримувати інформацію про важкодоступні райони*, по-четверте, *високий ступінь генералізації інформації.*

Методами ДЗЗ із космосу добувається видова комерційна, наукова, господарська та розвідувальна інформація. Для добування видової інформації із космосу в інтересах національної безпеки використовуються як комерційні апарати, що здійснюють ДЗЗ, так і суто розвідувальні космічні апарати.

Сучасні методи дистанційного зондування передбачають використання різноманітної апаратури – від переносних приладів та платформ до авіаносіїв і супутників.

За способами розташування знімального обладнання щодо об'єкта дослідження та середовища ДЗЗ поділяється на три сегменти: *повітряний*, *космічний* та *наземний*.

6.1.1. Пасивні методи дистанційного зондування

У пасивних методах зондування в оптичному діапазоні джерелами електромагнітної енергії є розігріті до високої температури тверді, рідкі, газоподібні тіла.

Під час пасивної зйомки інформацію отримують двома способами:

– шляхом реєстрації сонячного ЕМВ, відбитого від об'єкта;

– виміром радіаційного потоку, що випромінюється самим об'єктом (власне випромінювання об'єкта) в широкому діапазоні хвиль.

Схему одержання інформації за допомогою пасивних методів зондування подано на рис. 6.2.

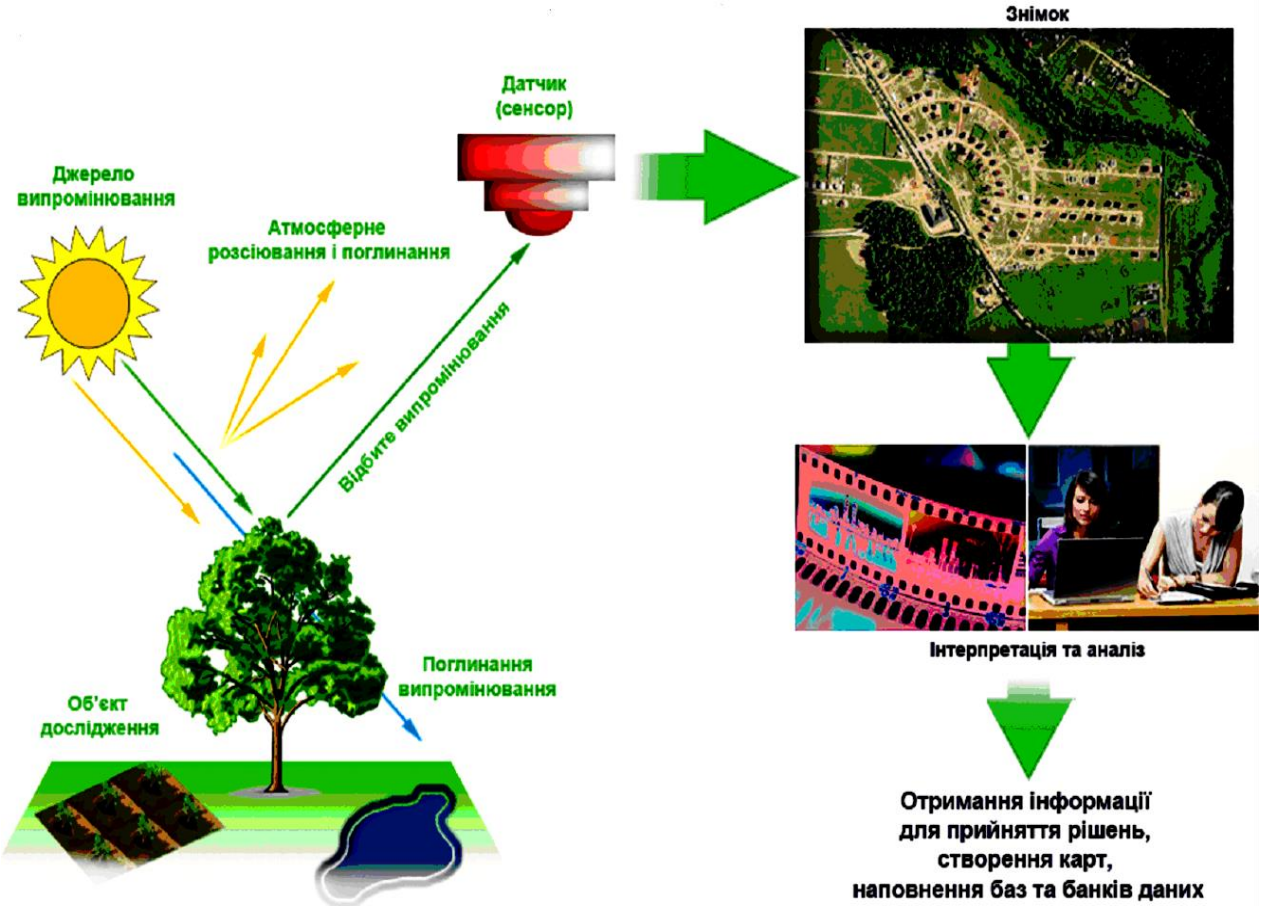


Рис. 6.2. *Ілюстрація пасивного методу дистанційного зондування*

Під час *пасивних методів зйомки* використовуються прилади, які реєструють *емісійне*, *відбите* та *розсіяне* природне чи ЕМВ об’єкта зондування.

До пасивних сенсорів (датчиків) відносяться:

– *фотографічні*, які дають можливість одержання зображення у видимому (оптичному) і близькому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні спектра;

– *телевізійні*, де сенсором виступає фотоелектрична поверхня (діапазон спектра аналогічний фотографічним сенсорам);

– *інфрачервоні сканери*, які реєструють випромінювання в тепловому діапазоні;

– *багатоканальні сканери*, що охоплюють видимий, близький ІЧ, середній ІЧ та тепловий діапазони.

Пасивні методи мають певні обмеження застосування: залежність інформації, що реєструється, від спектральних характеристик та положення Сонця, метеорологічних і кліматичних умов, оптичних параметрів атмосфери та ґрунту.

6.1.2. Активні методи дистанційного зондування

При *активних методах* використовуються прилади, що містять джерело ЕМВ із заданими параметрами для опромінювання об’єктів зондування та реєстрацію відбитого випромінювання або флуоресценції об’єктів дослідження.

Активні сенсори самі генерують енергію випромінювання з борту аеро- або космічного літального апарату за допомогою штучного випромінювача (лазера – оптичного генератора, радіогенератора) і реєструють відбите випромінювання від поверхні Землі (рис. 6.3).

Рис. 6.3. *Ілюстрація активного методу дистанційного зондування*

До них відносяться:

– *радіолокаційні* сенсори (діапазон: 0,1 см…5 дм) створюють ЕМХ, які посилають до об'єкта, а відбиті від об'єкта ЕМХ фіксуються антеною);

– *лідари* (джерелами випромінювання виступають потужні лазери, що формують когерентне (узгоджене за частотою і фазою) випромінювання в оптичному діапазоні).

Перевага активних знімальних систем полягає в тому, що вони не залежать від погоди, часу доби. Хмарний покрив також у цьому випадку не є перешкодою.

Залежно від поставленого завдання сенсори можуть розташовуватись на *наземних*, *повітряних* або *космічних* платформах.

В активних методах ДЗЗ для створення первинного потоку опромінення Землі використовуються радіолокатори різних типів і діапазонів, рідше застосовуються лазерні локатори (лідари). Джерелом цільової інформації є потік відбитого від різних природних утворень радіо- або світлового (інфрачервоного) випромінювання.

Вони також характеризуються більшою чутливістю та просторовим розрізненням. Недоліком активних методів є висока вартість. Існують принаймні дві причини такої ціни космічної інформації. Перша – це високий технологічний рівень космічної галузі, де просто немає місця дешевим рішенням. Друга причина – космічні дані є надзвичайно ємними та інформаційно насиченими, завдяки чому їх використання у багатьох випадках надає можливість суттєво підвищувати ефективність

виконання різноманітних актуальних завдань на Землі. Тому потреба у видовій космічній інформації у світі постійно зростає, що відображається на її вартості.

До дистанційних методів іноді відносять технічні прийоми фіксації різних властивостей ландшафту й фізичних полів, а також способи оброблення отриманої інформації.

Також варто зазначити відмітити, що ціни на видову космічну інформацію на світовому ринку є гнучкими, залежно від обсягу замовленої інформації, району зняття, статусу покупця (наприклад, для навчальних закладів існують знижки) тощо.

6.2. Способи одержання інформації при дистанційному зондуванні

Аеро- та супутникові знімки отримують за допомогою спеціальної апаратури – *знімальних систем багаторазової дії*.

Сучасні знімальні системи – це комплекс технічних засобів для отримання інформації про об'єкт дослідження у вигляді зображень об'єкта або в іншій формі, яка або дає змогу переходити до зображення, або дає інформацію в певних точках поверхні.

ДЗЗ сьогодні – це величезне розмаїття методів отримання зображень практично у всіх діапазонах довжин хвиль електромагнітного спектра – від ультрафіолетового до далекого інфрачервоного і радіодіапазону, найрізноманітніша оглядовість зображень – від знімків з метеорологічних геостаціонарних супутників, що охоплюють практично цілу півкулю, до детальних зйомок ділянок у декілька сотень квадратних метрів.

Основне завдання ДЗЗ полягає у встановленні емпіричних або модельних зв'язків між реєстрованим полем ЕМВ, відбитого від об'єкта, і параметрами, що характеризують його стан. Зазначені чинники є основою наступної класифікації способів одержання інформації при ДЗЗ:

– візуальні і візуально-інструментальні – 0,4–1,3 мкм;
– фотографічні і телевізійні – 0,3–1,1 мкм;
– спектрометричні – 0,3–3,0 мкм;
– інфрачервоні (ІЧ);
– радіометричні – 0,03–3,0 мм;
– мікрохвильові (НВЧ) – 0,3–10,0 см;
– радіолокаційні – 10–70 см.

6.2.1. Візуальні і візуально-інструментальні спостереження

Візуальне спостереження – це вид оперативного спостереження, який полягає у зоровому дослідженні об'єкта спостереження.

Візуальне спостереження може вестись неозброєним оком і з використанням оптичних приладів, приладів інфрачервоної техніки і телевізійної апаратури.

Візуальні аерокосмічні спостереження – пряме спостереження з літальних апаратів за станом атмосфери і земної поверхні, а також наземних об'єктів.

У наш час безпосередні візуальні спостереження широко використовуються в космічних дослідженнях як важливий (а іноді й незамінний) метод наукового пізнання. Візуальні спостереження з борту пілотованої орбітальної станції – найбільш простий і дуже ефективний метод дослідження параметрів атмосфери, поверхні суходолу й океану з космосу у видимому діапазоні. З орбіти штучного супутника Землі око людини може впевнено визначити межі хмарного покриву, типи хмар, межі виносу каламутних річкових вод у море, оглянути рельєф дна на мілководді, визначити характеристики океанічних вихорів і пилових бур діаметром у кілька сотень кілометрів, розрізнити типи планктону тощо. Комплексне сприйняття явищ, за якими здійснюється спостереження, вибіркова здатність людського зору й логічний аналіз результатів спостережень – це ті унікальні властивості методу візуальних спостережень, якими не володіє жоден набір апаратури.

Можливості візуального методу спостережень можна істотно збільшити, якщо використовувати інструменти, що розширюють можливості людського зору. Це можуть бути біноклі, зорові труби, прилади нічного бачення з оптико-електронним посиленням світла.

Візуальні спостереження природних об’єктів із літаків, гелікоптерів чи супутників дозволяють збільшити виконання низки завдань з дослідження природних ресурсів Землі за рахунок скорочення обсягу інформації (її генералізації), її попереднього оброблення та передачі на Землю.

Спостереження земної поверхні з космічної висоти дозволяє дослідити об’єкти місцевості регіонального характеру, які не видно з Землі. Вони виділяються за рахунок генералізації зображення – око людини не сприймає дрібних деталей ландшафту, але виділяє великі елементи. Цьому ж сприяє "ефект просвічування" стародавніх великих геологічних розломів, стародавніх русел річок, укритих товщею пухких відкладень наступних століть [76].

Візуальні спостереження із космосу й повітря можуть поєднуватися з фіксацією окремих вибраних об’єктів та з інструментальним розпізнаванням на знімках контурів місцевості.

6.2.2. Фотографічні і телевізійні зйомки

Знімок – зображення об’єктів, яке одержується в результаті дистанційної реєстрації їх власного або відбитого випромінювання і призначається для виміру та дешифрування. Знімки одержують у результаті зйомок з літаків та космічних апаратів.

Фотографічні системи – це фото- або електронні камери, які забезпечують одномоментне одержання всього кадру знімка. Космічні зображення відрізняються високим розрізненням і можуть бути збільшені в декілька разів без втрат інформативності.

Фотографічні зйомки. Для зйомки земної поверхні з пілотованих космічних кораблів використовуються фотографічні системи таких марок: КАТЭ-140 (рис. 6.4), МКФ-6 (рис. 6.5), ФМС й інші.

Фотографічна камера МКФ-6М має шість спектральних каналів, що працюють у таких зонах спектра (мкм): 0,45–0,50; 0,52–0,56; 0,58–0,62; 0,64–0,68; 0,70–0,74; 0,78–0,86. Зображення відрізняється високим розрізненням і може бути збільшене у декілька разів без втрати інформативності. Масштаб знімків, знятих з висоти 265 км, трохи дрібніший від 1:2 000 000. Зональні знімки 1–4 каналів витримують збільшення до 60 разів і в такому збільшеному вигляді цілком придатні для цілей геологічного дешифрування. Знімки, отримані по п'ятому і шостому каналах, витримують тільки десятикратне збільшення.

Рис. 6.4. *Фотографічна система КАТЭ-140*

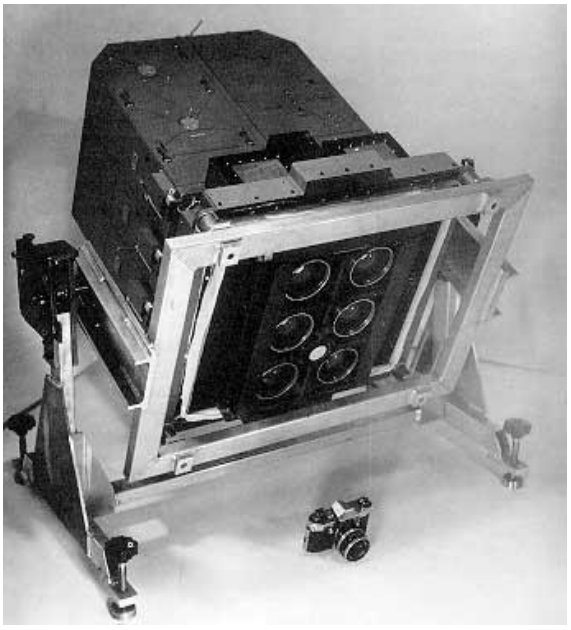


Рис. 6.5. *Фотографічна система МКФ-6*

Фотографічні зйомки – це найбільш інформативний вид зйомки з космічного простору. Оптимальний розмір відбитка 18х18 см, який, як свідчить досвід, узгоджується з фізіологією людського зору, дозволяючи побачити все зображення одночасно.

Для зручності користування з окремих супутникових знімків, що мають перекриття, монтуються фотосхеми (фотомозаїки) або фотокарти з топографічною прив'язкою опорних точок з точністю 0,1 мм і точніше. Для монтажу фотосхем використовуються тільки планові супутникові знімки.

Для приведення різномасштабного, зазвичай перспективного, космічного знімка до планового використовується спеціальний процес, який називається *трансформуванням*. Трансформовані супутникові знімки успішно використовуються для складання космофотосхем та космофотокарт і зазвичай легко прив'язуються до географічної сітки координат.

Масштаби фотографічної зйомки залежать від двох найважливіших параметрів: висоти зйомки і фокусної відстані об'єктива. Космічні фотоапарати залежно від нахилу оптичної осі дозволяють отримувати *планові* і *перспективні* знімки земної поверхні.

Фотографічні знімальні системи працюють у видимій та близькій ІЧ ділянках спектра і дають можливість отримати чорно-білі, кольорові, спектрозональні та багатоспектральні фотозображення. Знімання виконують з аеро- та космічних літальних апаратів. Чорно-білі фотознімки широко застосовують у фотограмметрії завдяки високим вимірним властивостям. Особливо покращує процес фотоінтерпретації зображень спектрозональна фотографія, виконана на спеціальних фотоматеріалах, які містять фотошари, чутливі до певних спектральних зон.

Варто зазначити, що фотоматеріали, чутливі до ІЧ смуги спектра, мають підвищені інтерпретаційні можливості стосовно аналізу стану рослинності, впливу діяльності людини на довкілля та екологічну ситуацію. Як окремий вид спектральної фотографії можна виділити фотографію багатоспектральну, що дає змогу через світлофільтри реєструвати вузькі смуги ЕМВ, відбитого від об'єктів місцевості. Практично в сучасній аерокосмічній зйомці застосовують переважно кадрові фотографічні системи зйомки, в яких зображення створюється на засадах центрального проєктування.

Основні можливості передачі зображення територій на плівці, масштаб фотографій і розрізненність багато в чому визначаються об'єктивами.

До об'єктивів висуваються такі вимоги [82]:

– повна ортоскопічність зображень і мінімальні величини інших аберацій;

– висока розрізненність;

– необхідний залежно від виконуваних завдань кут зображення;

– рівномірна освітленість поля зображення;

– найбільша світлосила;

– забезпечення витримки 1/500–1/1000 і менше.

Передача зображення і розрізненність вищі у довгофокусних об'єктивів. При фотографуванні ширококутними об'єктивами через велику площу охоплення і сферичність поверхні на краях знімка виникають великі спотворення.

При геологічних дослідженнях до споживача надходять перспективні космофотознімки, космофотосхеми і трансформовані космофотознімки.

Телевізійні системи працюють у тому ж спектральному діапазоні (0,4–0,9 мкм), що і фотографічні камери. Основна відмінність від фотографічних полягає в тому, що замість фотокамери використовується телекамера. Використання декількох телекамер зі світлофільтрами дозволяє одержувати багатозональне зображення.

За допомогою телевізійних систем зображення місцевості будується оптичним способом на електронно-променевій трубці, а потім або фотографується, або радіоканалами передається на наземні пункти. Відтворюється зображення в режимі реального часу як безпосередньо на екрані приймача, так і з магнітних цифрових записів. Розрізнення телевізійних знімальних систем невисоке, тому їх використовують для виконання оглядових завдань (дослідження великих територій поверхні або океанів, дослідження хмарності, оцінювання результатів стихійних явищ, повеней, катаклізмів тощо).

До недоліків телевізійних систем також відносять великі геометричні і фотометричні викривлення та залежність від погодних умов.

6.2.3. Спектрометрична зйомка

Спектрометрична зйомка дозволяє отримувати дані про спектральні відбивні властивості природніх об'єктів. Для спектрометричної зйомки використовуються спеціальні прилади, які називаються *спектрометрами*.

Методика спектрометричної зйомки полягає у вимірюванні коефіцієнтів спектральних яскравостей природних утворень щодо еталона, причому для реєстрації величини спектральної яскравості застосовується як фотографічний прийом випромінювання, так і фотоелектричний. Залежно від використовування спектрального інтервалу виділяється 3 види спектрометричної зйомки:

– *мікрохвильова* (0,3 см – 1,0 м), яка є універсальною, оскільки виключає вплив атмосфери;

– *ІЧ (теплова)* (0,30–1000 мкм), яка виявляє температурні неоднорідності за енергетичною яскравістю досліджуваних об'єктів;

– *спектрометрія видимого і ближнього ІЧ спектра випромінювання* (0,30–1,40 мкм), що фіксує спектральний розподіл відбивного радіаційного випромінювання.

Спектрометрію видимого й ІЧ спектра випромінювання використовують при вивченні властивостей земної поверхні та атмосфери. Теплова спектрометрія допомагає визначити температурні неоднорідності поверхні випромінювання.

За допомогою спектрометричної зйомки можна розв'язувати такі завдання:

– визначення концентрації озону і вуглекислого газу в атмосфері;

– визначати наявність нафтової плівки на водній поверхні;

– досліджувати сніговий покрив і лід;

– визначати вміст парів у атмосфері;

– вивчати вологість ґрунтів тощо.

Мікрохвильова спектрометрична індикація є найбільш універсальною для вивчення поверхні Землі, оскільки вже при довжині хвилі 1,5 см виключається вплив атмосфери. Процес зйомки включає сканування зображення на місцевості, спектральний поділ випромінювання, що надходить до приладу, перетворення променистої енергії на електричну і реєстрацію величин, пропорційних отриманим сигналам. Досвід розпізнавання природних утворень на основі спектральних яскравостей свідчить, що надійне пізнання окремих об'єктів вимагає виконання зйомки у низці вузьких зон спектра, що забезпечують необхідний контраст із навколишнім фоном, причому кількість діапазонів, достатніх для виконання тих або інших завдань, може варіювати. При супутникових експериментах використовуються багатоспектральні скануючі радіометри 4–6 каналів, що виконують зйомки у діапазонах:

– видимому;

– 3–4 канали у ближньому ІЧ;

– 2–4 канали в ІЧ тепловому;

– 3–5 каналів у радіодіапазоні.

Обробка отриманих спектральних характеристик здійснюється за допомогою комп'ютерів. Головним моментом є знання спектрального образу об'єкта, визначеного розмірами об'єкта й особливостями його оптичних властивостей.

Для ухвалення рішення щодо належності поточної точки до об'єкта потрібне використання апріорних даних про спектральні характеристики випромінювання об'єкта. Спектральні характеристики, отримані в результаті автоматичної обробки, при порівнянні з результатами прямої фотоінтерпретації дають можливість оцінити інформативність окремих діапазонів спектра для вивчення земної поверхні. Наприклад, на певній довжині хвилі пісок відбиває більше енергії, ніж зелена рослинність, тоді як на іншій ділянці спектра пісок абсорбує більше, ніж рослинність. Практично це дозволяє розпізнавати і класифікувати різні об'єкти на поверхні за їх відмінностями у відбивній здатності в різних спектральних зонах.

Складність прикладного використовування спектральної індикації полягає в недостатньо вивчених спектральних характеристиках природних об'єктів, хоча відомості про це останнім часом значно розширилися.

В геології спектрометрична зйомка проводиться з метою виміру відбивної здатності гірських порід. Знання значень коефіцієнта спектральної яскравості гірських порід розширює можливості геологічного дешифрування, надає йому більшої достовірності. Гірські породи мають різну відбивну здатність, тому відрізняються величиною КСЯ.

Геологічні об'єкти відображаються на супутникових знімках з різним ступенем контрасту, що залежить від їх спектральних особливостей. Робота зі складання банку даних про спектральні характеристики гірських порід надзвичайно трудомістка. Для того щоб її виконати, потрібно провести спектрометричні виміри гірських порід, а також інших ландшафтних об'єктів на різних відстанях, в різні пори року, на ділянках з різним ступенем оголеності. Ці дані, однак, є необхідними для систем автоматичного пошуку і розпізнавання об'єктів, зокрема й екологічного змісту. На сьогодні збільшення прикордонних контрастів досягається використанням багатозональних знімків, отриманих у відносно вузьких зонах спектра.

За допомогою аероспектрометричних зйомок можна розв'язати такі завдання:

1) вивчення спектральних характеристик району для визначення найбільш ефективних природних та технічних умов проведення наступних зйомок;

2) отримання більш чітких зображень місцевості в межах найбільш інформативних для регіону вузьких зон електромагнітного спектра;

3) пошуки відокремлених об'єктів з відомими спектральними характеристиками під час зйомок у більш інформативних зонах та трансформації вихідного сигналу;

4) отримання зображень в окремих умовах, де звичайне фотографування менш ефективне (фотографування дна морів тощо).

Сканерні системи відрізняються від інших знімальних систем передусім принципом побудови зображення. У знімальних системах оптико-електронного типу приймачами сигналів слугують оптико-механічні сканери і пристрої із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) лінійкового або матричного типу. Ці пристрої є фактично фотонними детекторами, світлочутливий шар яких складається із кремнієвих або інших діодів. Зображення будується оптичним способом у межах лінійки або матриці. Якщо використовують ПЗЗ-лінійки, то зображення будується скануванням

(переглядом) місцевості за рядками (рис. 6.6, а). Все зображення формується послідовним під'єднанням рядків за рахунок переміщення літального апарата.

Сканувальний пристрій сприймає відбитий (випромінений) електромагнітний потік від елементарних майданчиків об'єкта знімання 1, які розташовуються вздовж рядка. Розмір майданчика залежить від висоти зйомки, миттєвого кута 2α зображення оптичної системи 2 сканера і положення відносно осі сканування (рис. 6.6, *б*).

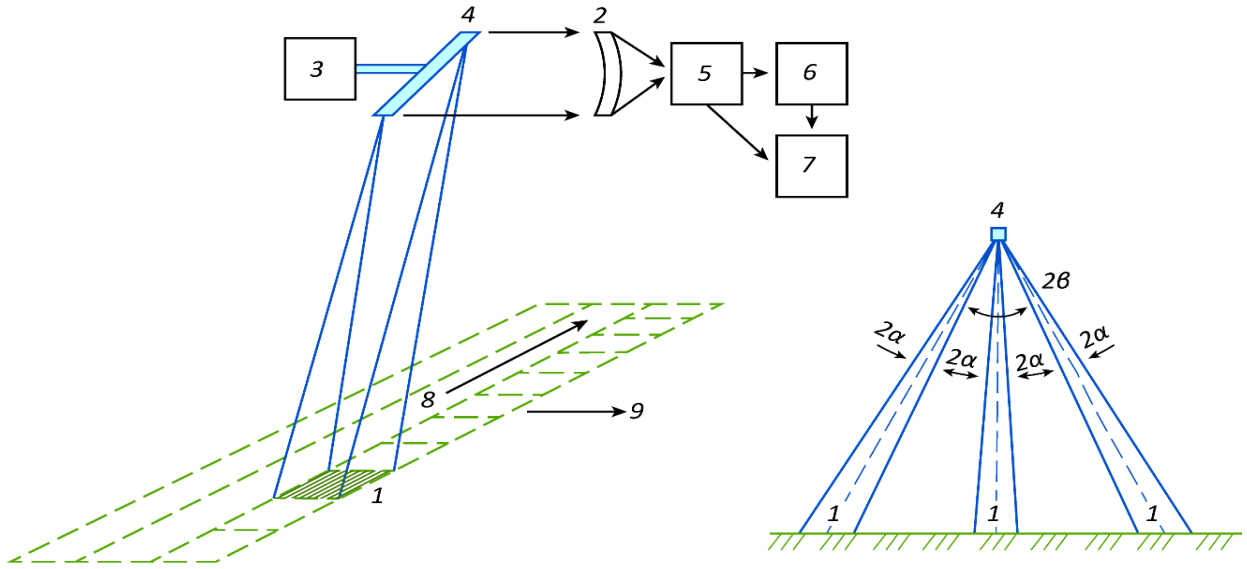


Рис. 6.6. *Схема сканування місцевості*

Кут захоплення 2β визначає ширину смуги на місцевості.

Перехід від одного рядка до іншого (порядкова розгортка) відбувається в результаті поступального руху літального апарату. Для виключення розривів між рядками швидкість сканування узгоджується з висотою і швидкістю польоту. Пристроями сканування можуть бути оптичні елементи: плоскі дзеркала, дзеркальні призми, піраміди тощо.

В сканерних системах застосовують різні типи приймачів ЕМВ: теплові (теплоелектричні) і фотонні (фотоелектричні). Теплові системи працюють на основі перетворення теплової енергії на електричний сигнал, у фотонних системах рівень сигналу визначається кількістю поглинених фотонів.

Найбільшого розповсюдження набули сканери, приймачами яких слугують лінійки ПЗЗ.

Стандартний ПЗЗ – досить складна електронна мікросхема, яка є двовимірною матрицею з дуже маленьких детекторів світла. У кожному детекторі нагромаджуються електрони під дією фотонів, які надходять від об'єкта.

ПЗЗ охоплюють видиму та близьку ІЧ ділянки спектра, тобто працюють в оптичному діапазоні, який широко використовується в дослідженні природних ресурсів Землі. Залежно від яскравостей об'єктів на кожен детектор надходить певний сигнал, який генерує електричний струм, пропорційний до яскравості

об’єктів. Електричний сигнал переноситься в певну комірку заряду, а згодом в електронний блок, де підсилюється та оцифровується.

В сучасних умовах знімальні системи оптико-електронного типу використовуються дуже широко. Як відомо, зйомка може вестись в одному спектральному діапазоні, коли на зображенні фіксується або декілька зон спектра (наприклад, зелений і червоний), або вся видима ділянка спектра (в цьому разі зображення називають панхроматичним). Під час багатозональної зйомки отримують декілька роздільних зображень у різних зонах спектра. При цьому з декількох спектральних зон можна синтезувати не один, а безліч варіантів кольорового зображення, причому за допомогою комп’ютера це виконується миттєво. Кожен варіант такого кольорового зображення (варіант синтезу) містить інформацію про об’єкти, яка дещо відрізняється. На одному краще виділяються дороги і споруди, на іншому – водні поверхні, на третьому – краще видно подробиці розподілу рослинності.

За знімками у різних зонах спектра можна встановити, які саме об’єкти зображені. Для цього яскравість зображення невідомого об’єкта на серії зональних знімків (тобто його спектральний образ) порівнюється з еталонними кривими, одержаними шляхом спеціальних вимірів на місцевості, що зберігаються в банку даних. Наприклад, якщо об’єкт темний у червоній зоні і дуже світлий у ближній ІЧ, можна впевнено стверджувати, що це рослинність.

Спектральні характеристики об’єкта безпосередньо пов’язані з енергетичною структурою речовин, що входять до його складу, і тим самим містять інформацію про склад об’єкта, його структуру, стан тощо. Наприклад, людське око, що має лише три колірні канали, які сильно перекриваються, здатне розрізняти мільйони відтінків, що дозволяє вирішувати різноманітні практичні проблеми, пов’язані із життєдіяльністю.

Як свідчать порівняння зору людини із зором птахів, які володіють 4-м каналом у ближньому УФ діапазоні, додавання лише одного каналу робить систему більш вибірковою і більш ефективною.

При багатозональному зніманні отримують декілька різних зображень у різних зонах спектра. При цьому з декількох спектральних зон можна синтезувати не один, а безліч варіантів кольорового зображення, причому за допомогою комп’ютера це виконується майже миттєво. Розглянемо це на прикладі. Нехай зніманню і розпізнаванню підлягають об’єкти *A*, *B* і *C*, криві спектральної яскравості яких наведено на рис. 6.7.

Якщо для зйомки використовується спектральний інтервал $\lambda = 0{,}5–0{,}8$ *мкм*, то чутливість приймача випромінювання в цьому інтервалі приблизно постійна й об’єкти *A* та *B* відобразяться приблизно з однаковою оптичною щільністю (рівнем сигналів), оскільки сумарний вплив випромінювання, що відбивається від цих об’єктів і доходить до приймача, приблизно однаковий. Отже, на чорно-білій фотографії або чорно-білому моніторі об’єкти, що різко відрізняються за кольором, наприклад, червоний і зелений, можуть відобразитися однаковим темно-сірим тоном.

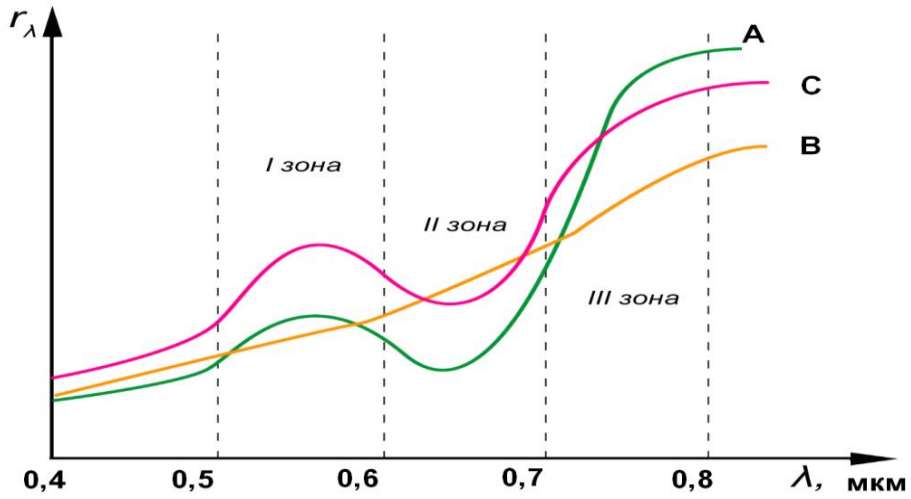


Рис. 6.7. *Обґрунтування необхідності багатозонального знімання*

Якщо спектральний інтервал реєстрації не може бути розширений або зміщений в будь-який бік, то виходом з даного стану буде *звуження інтервалу* і пошук його положення за спектром. Якщо прийняти, що спектральне розрізнення системи дорівнює 0,1 мкм, то такими інтервалами (зонами) для об'єктів *A* і *B* можуть бути зони II і III.

Але в будь-якому з цих варіантів виявляться нерозрізненими інші комбінації об'єктів, у II зоні – *B* і *C*, в III – *A* і *C*. В I зоні об'єкт *C* відокремиться від об'єктів *A* і *B*, проте останні тут будуть нерозрізненими. Зазначимо, що в обраних зонах комбінації розрізнених і нерозрізнених об'єктів будуть різними. Отже, при спільному аналізі зображень, отриманих у двох-трьох зонах, можна розділити всі об'єкти або навіть розрізнити їх, якщо відомі еталонні комбінації яскравостей цих об'єктів на знімках використовуваних зон.

6.2.4. Гіперспектральні зйомки

Інформативність даних, які отримує дистанційний сенсор, визначається набором його спектральних каналів. *Чим більше каналів має сенсор, тим більше спектральної інформації можна отримати*. Перші сенсори, наприклад Landsat, мали всього 7 каналів і відповідно могли отримувати обмежену кількість спектральної інформації.

Застосовуючи багатозональний принцип знімання, отримують багатозональні знімки, а при великій кількості знімальних зон – гіперспектральні, використання яких ґрунтується на спектральній відбивній здатності об'єктів знімання, їх спектральній яскравості.

Гіперспектральні сенсори (дистанційні спектрометри) отримують зображення в багатьох (дуже вузьких) каналах, розташованих у видимому, ближньому, середньому і тепловому інфрачервоному діапазонах спектра. Такі системи зазвичай мають 200–400 каналів даних, які дозволяють отримати ефективний безперервний спектр яскравості для кожного пікселя сцени. Таким чином, гіперспектральні сенсори отримують дані з високою спектральною розрізненністю, що дозволяє їм

проводити ідентифікацію мінералів, у той час як значно більші канали, наприклад Landsat, мають низьке розрізнення і не можуть розрізняти мінеральні спектри.

Більшість гіперспектральних зйомок все ще використовують аерosканери, такі як CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager), AVIRIS (Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer), SFSI (SWIR Full Spectrometer Imager), аерosканер HYDICE, що отримав назву за абревіатурою проєкту, в рамках якого цей сканер був розроблений (HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment), Probe-1, HyMap та інші. До космічних сенсорів відносяться Hyperion і ARIES-1, названий за іменем супутника, на якому він був встановлений (Australian Resource Information and Environment Satellite – Австралійський інформаційний супутник захисту навколишнього середовища).

Отримувані при гіперспектральній зйомці зображення схожі на мультиспектральні, проте відрізняються від останніх тим, що у кожного пікселя кількість колірних каналів не обмежується трьома основними: червоним, зеленим і синім.

Розрізняти гіпер- і мультиспектральні зображення можна за кількістю спектральних смуг або за типом виміру, за допомогою якого одержано зображення. При мультиспектральному способі одержання зображень відбувається дискретно і зі створенням декількох зображень. Мультиспектральний сенсор може мати багато смуг, що охоплюють спектр від видимої до довгохвильової інфрачервоної зони спектра. Проте мультиспектральні зображення не відтворюють "спектр" об’єкта, оскільки мультиспектральний сенсор формує декілька зображень на "окремій вузькій смузі частот" від видимого до інфрачервоного спектра. При гіперспектральній обробці відбувається візуалізація вузьких спектральних ліній, тобто гіперспектральний сенсор одночасно формує зображення на всіх ділянках спектрального діапазону і одержує спектри всіх пікселів сцени.

Під час гіперспектральної зйомки формується багатовимірне зображення, в якому два виміри характеризують просторове положення точок місцевості, а третє – їх спектральні властивості (рис. 6.8).

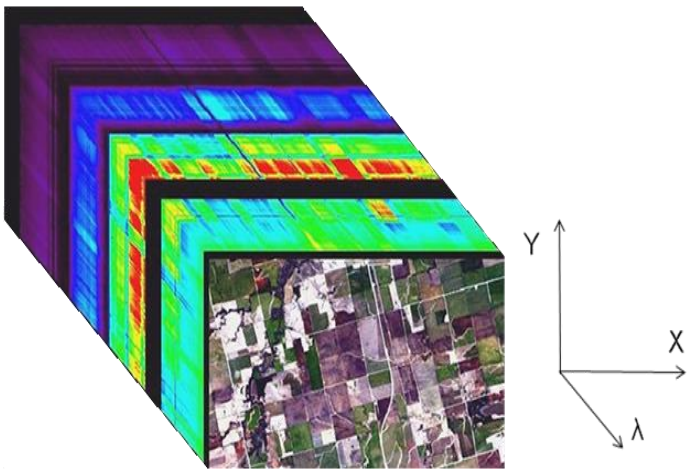


Рис. 6.8. *Двовимірна проєкція гіперкуба:*
X, Y – просторові координати; λ – кількість спектральних каналів, кожен з яких має власне спектральне значення

У площині *XOY* формується просторове зображення об'єкта знімання, для кожного пікселя якого існує розгортання по довжині хвилі λ. Крім трьох зазначених координат, до них може додаватись і поляризаційна координата.

Для обробки як аеро-, так і космічних гіперспектральних даних потрібні стандартні спектри відбитої яскравості мінералів, на підставі яких спектральні дані можуть бути класифіковані.

Спектри відбиття матеріалів з відомим складом розраховуються в лабораторних умовах, а потім збираються в бібліотеку спектрів, що суттєво спрощує аналіз гіперспектральних знімків. У відкритому доступі знаходиться декілька бібліотек, що містять спектри відбиття природних і штучних матеріалів.

На даний час використовується велика кількість різних методів для виділення інформації із зображень з високим спектральним розрізненням, але всі вони дотримуються такого підходу. Спочатку дані, отримані з дистанційного спектрометра, корегують для приведення до істинної відбитої яскравості. Потім проводять один з кількісних тестів для визначення ступеня кореляції спектра зображення (отриманого від невідомих матеріалів) з бібліотечними спектрами відомих матеріалів. Ці спектри можуть бути отримані різними способами – виміряні на полі, отримані в лабораторії або виділені з даних зображення, що аналізується в тих просторових точках, де склад матеріалів відомий. Результат інтерпретації зображення зазвичай подається у вигляді карти розподілу мінералів, яка відносить до кожного пікселя мінерал, умовна імовірність появи якого в даній точці максимальна. Більшість методів аналізу, розроблених спеціально для гіперспектральних даних, проводять коректний, хоча й обмежений, аналіз і для мультиспектральних даних.

Усі наявні методи аналізу можуть бути розділені на дві непересічні групи – "піксельні" і "субпіксельні".

Піксельні методи передбачають, що кожен піксель складається з одного чистого матеріалу. Для ідентифікації матеріалу проводиться порівняння спектра яскравості кожного пікселя зображення, що аналізується, з набором лабораторних спектрів. Потім отримані результати опрацьовуються класифікатором, який дає можливість визначити, до якого із спектрів найімовірніше повинен бути віднесений аналізований піксель. Класифікатором може бути один із стандартних керованих класифікаторів (що використовує критерії мінімальної дистанції або максимуму правдоподібності) чи спеціально розроблені для аналізу гіперспектральних даних процедури, такі як алгоритм SAM (Spectral Angle Mapper), картування за спектральним кутом. Алгоритм SAM розраховує (у багатовимірному просторі значень спектрів) мінімальний кут між вектором аналізованого пікселя і вектором кожного лабораторного спектра. На виході SAM дається кількісна оцінка тих абсорбційних властивостей аналізованого пікселя, які відносяться до аналізованих мінералів. Інші підходи порівняння спектра пікселя і лабораторних спектрів використовують визначення спектральних властивостей. Для цього може використовуватись, наприклад, метод нейронних мереж BNP (Back-Propagation Network, мережа зі зворотнім розповсюдженням), який дозволяє аналізувати всі пікселі одночасно.

Субпіксельні методи аналізу передбачають, що піксель утворюється випромінюванням декількох матеріалів.

Щоб зрозуміти необхідність застосування гіперспектральної зйомки, треба згадати, що людське око бачить видиме світло тільки в трьох діапазонах (червоному, зеленому і синьому), а при гіперспектральній зйомці спектр поділяється на сотні діапазонів, отже, може більш ефективно виявляти об'єкти за їх фізико-хімічним складом, ідентифікувати видовий склад і стан рослинного покриву, визначати геологічну структуру, виявляти хімічний склад води тощо. Гіперспектрометр багато в чому перевищує можливості людського ока (за спектральним і просторовим розрізненням, можливістю реєстрації інтенсивності, чутливості до ультрафіолетової та інфрачервоної зон випромінювання, до поляризації тощо).

Гіперспектральне зображення трохи нагадує суперзір. За його допомогою можна не тільки ідентифікувати об'єкт, але й те, з чого він складається або зроблений. У сукупності з експертною системою (базою знань) гіперспектрометр можна вважати приладом, що володіє властивостями інтелектуального зору. В значному ступені інтелектуальність систем управління пов'язана з їх здатністю сприйняття як тривимірної картини навколишнього світу, так і одержання колірної (спектральної) картини про цей світ, а також підтримки управлінських рішень.

При ГСЗ територій більшість об'єктів, що потрапляють у поле зору датчика, неоднорідні. Тобто спектральний склад обчислюваного пікселя є комбінацією спектральних характеристик об'єктів, які цей піксель утворюють. У зв'язку з цим виникає низка нових завдань. По-перше, потрібне "очищення" спектральної характеристики об'єкта для його більш надійної класифікації з використанням бібліотек спектральних еталонів. По-друге, привабливою є можливість відновлення інформації про компонентний склад пікселів зображення, тобто субпіксельної класифікації.

Під субпіксельною класифікацією розуміють процедуру, в ході якої вимірюваний спектр пікселя розбивається на набір складових спектрів (кінцевих елементів, об'єктів) з визначенням відповідних часток (показників відносного вмісту), які показують пропорції кожного конкретного об'єкта, що входять до складу пікселя.

Кінцеві елементи можуть відповідати відомим макроскопічним елементам середовища, таким як вода, ґрунт, метал, рослинність або іншим об'єктам.

Для розв'язання зазначених завдань (як для класифікації об'єктів розміром у декілька пікселів, так і для субпіксельної класифікації) доцільно використовувати методи штучного інтелекту: нечіткої логіки, еволюційних обчислень тощо. Зазначені підходи дозволяють гнучко адаптуватись до розв'язуваного завдання, особливо в умовах невизначеності.

Також треба враховувати, що при проходженні сонячного випромінювання крізь атмосферу відбувається зміна його інтенсивності, спричинена впливом молекул газів і наявних в атмосфері частинок. Тому гіперспектральні дані містять інформацію не тільки про поверхню, але й про стан атмосфери. Для усунення цього фактора спотворення і переведення зображення з одиниць спектральної

яскравості в одиниці спектрального коефіцієнта відбиття потрібно проводити процедуру атмосферного корегування.

Для одержання ГСЗ використовуються спеціальні гіперспектральні камери, принцип дії яких можна зрозуміти з рис. 6.9.

Прилад працює за наступним алгоритмом. Відбитий від об'єкта досліджуваний сигнал потрапляє на вхідний об'єктив 1, що фокусує його на щілину 2, яка встановлюється перпендикулярно напрямку руху носія з гіперспектрометром і "вирізає" вузьку смужку поверхні знімання. Далі вирізана смужка потрапляє на диспергуючий елемент 3, який розташований так, щоб площина розташування світла була перпендикулярна щілині.

Таким чином, смужка світла розкладається по довжинах хвиль, утворюючи спектральну координату зображення.

Рис. 6.9. *Принцип дії гіперспектральної камери*

Розкладений сигнал потрапляє на оптичну систему 4 (вихідний об'єктив), що проєктує його на приймач цифрової камери, де зображення фіксується і зберігається у вигляді безперервної послідовності відеокадрів або одного чи декількох кадрів відеозапису в програмі, що задається оператором, який виконує роботу в цей момент часу.

Далі вже оцифрований сигнал записується керуючим комп'ютером на жорсткий диск, флешкарту або інший пристрій для довготривалого збереження і наступного відтворення, обробки або ж для подачі на монітор для перегляду оператором.

Для кожного пікселя одержаного зображення, таким чином, визначається яскравість, яка є третьою "координатою" точки в гіперкубі. У міру руху апарата (наприклад, прольоту над досліджуваною поверхнею) знімається нова смуга поверхні, створюючи послідовність кадрів, які пізніше об'єднуються в цілісне зображення відзнятої поверхні – спектральне зображення.

Диспергувальними елементами можуть бути призма (рис. 6.10), дифракційна решітка (рис. 6.11), набір вузькосмугових фільтрів (рис. 6.12) або клин (рис. 6.13), які розкладають вхідний світловий пучок у кутовий спектр.

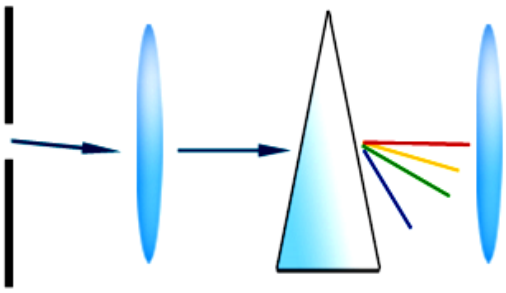


Рис. 6.10. *Призмовий спектрометр*

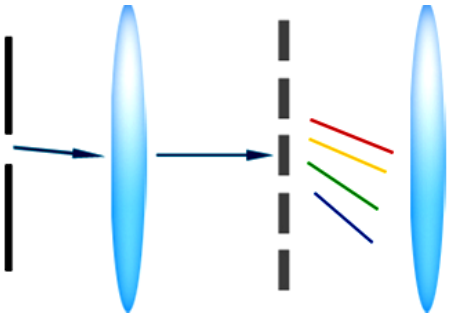


Рис. 6.11. *Решітчастий спектрометр*

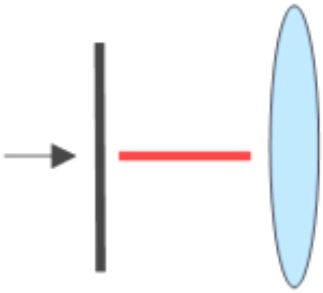


Рис. 6.12. *Фільтровий спектрометр*

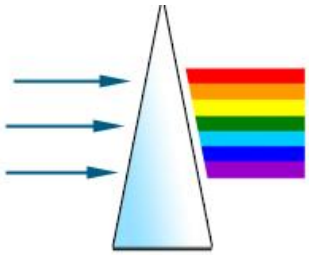


Рис. 6.13. *Клиновий спектрометр*

Інтерференційні спектрометри використовують статичний і динамічний Фур'є-спектрометри (ФС). Одержання спектра відбувається в два етапи: спочатку реєструється інтерферограма досліджуваного випромінювання, а потім шляхом її Фур'є-перетворення обчислюється спектр. Зміна різниці ходу інтерферуючих пучків приводить до модуляції інтенсивності монохроматичних складових випромінювання, причому частота модуляції однозначно визначається довжиною хвилі. Сигнал, що виникає при цьому на приймачі, є Фур'є-перетворенням від функції розподілу енергії за частотами, тобто від спектра досліджуваного випромінювання. Для одержання звичайного спектра потрібно здійснити зворотне Фур'є-перетворення.

Статичний ФС (рис. 6.14) є двопроменевим інтерференційним спектрометром, у якого диспергувальним пристроєм є інтерферометр бокового зсуву.

У динамічного ФС (рис. 6.15) диспергувальним пристроєм слугує інтерферометр Майкельсона.

Переваги ФС перед дисперсійними приладами визначаються передусім енергетичними перевагами. По-перше, вхідний отвір ФС набагато більший від вхідного отвору дисперсійних приладів. По-друге, у ФС час реєстрації кожного спектрального інтервалу дорівнює часу реєстрації всього спектра (виграш Фелжета – мультиплекс фактор), в той час як у дисперсійних приладів кожний спектральний інтервал реєструється окремо. Перераховані чинники дають виграш у реєстрації випромінюваної енергії в чотири рази (рис. 6.16).

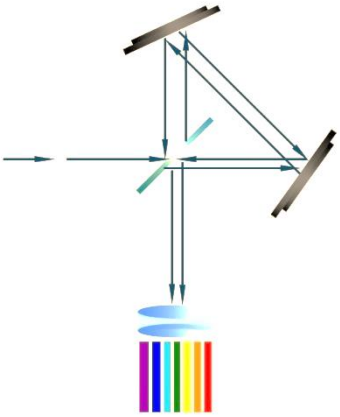


Рис. 6.14. *Статичний Фур'є-спектрометр*

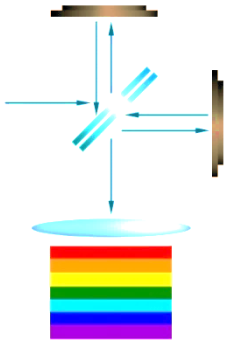


Рис. 6.15. *Динамічний Фур'є-спектрометр*

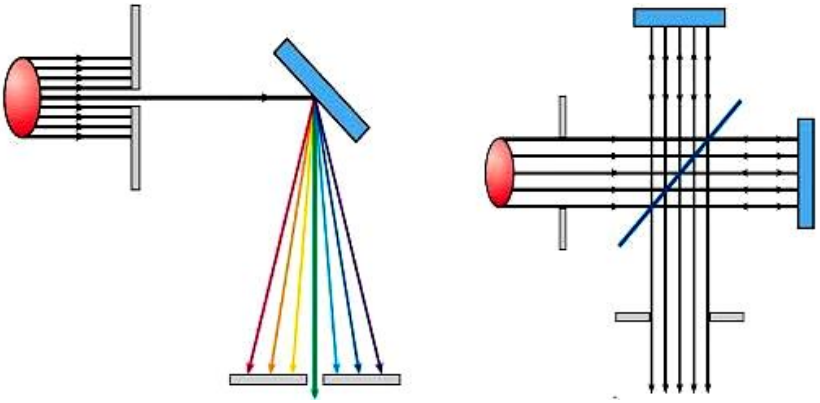


Рис. 6.16. *Спектрографи: ліворуч – дисперсійний; праворуч – Фур'є-спектрограф*

По-третє, в ФС відсутні обмеження спектрального розрізнення через розміри оптичних елементів. Тому максимальна межа розрізнення дисперсійних приладів обмежується величиною 0,02 см $^{-1}$, а в ФС ця межа досягає 0,0002 см $^{-1}$.

По-четверте, через відсутність вимог вузьких вхідних і вихідних щілин знижуються вимоги до конструкції оптичних схем без аберацій, а враховуючи, що в спектральних приладах для одержання більш широкого спектрального діапазону використовується дзеркальна оптика, для якої безабераційні схеми створюються набагато складніше, ніж для лінз, то цей чинник є дуже важливим (виграш Жакіно – геометричний фактор). У ФС можна використовувати більші тілесні кути в джерела і в приймача, тим самим пропускати більшу кількість енергії при високому розрізненні.

По-п'яте, зменшення вимог до конструкції оптичних схем робить можливим створення оптичних схем з великим відношенням діаметра об'єктива до його фокусу (1:3), що апріорі робить ФС більш компактними порівняно з дисперсійними приладами.

По-шосте, висока чутливість ФС дає можливість використання світловодів для передачі інформації, а отже, й дослідження зразків дистанційно від лабораторії.

Способи гіперспектральної зйомки подано на рис. 6.17.

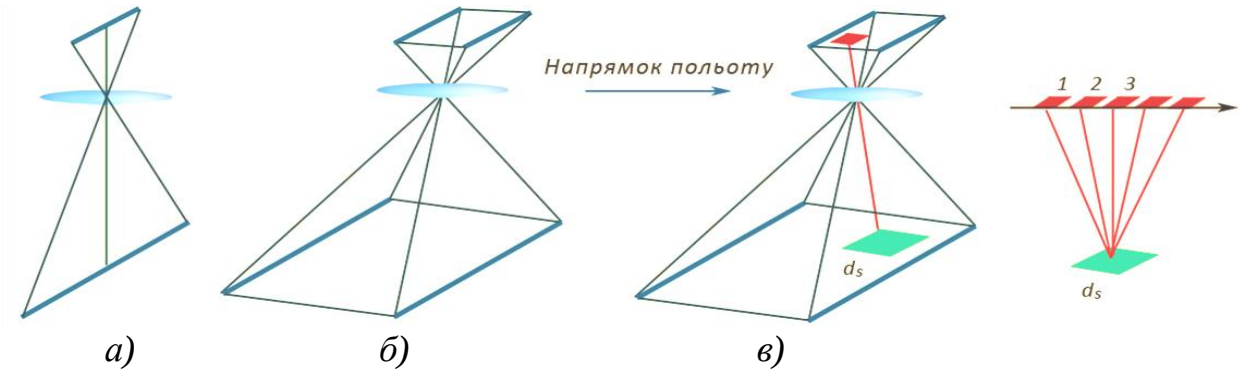


Рис. 6.17. *Способи зйомки:*
а) щілинний (push-broom); б) кадровий (framing); в) віконний (windowing)

Проєкти, в яких використовуються гіперспектральні знімки, зазвичай розв'язують такі завдання:

– *виявлення цілі (об'єкта)*: виділення об'єкта з множини подібних або виявлення об'єктів, розмір яких менший від номінального розміру пікселя;

– *розпізнавання матеріалів*: аналіз даних гіперспектральних знімків для розпізнавання невідомих матеріалів. Складання карт матеріалів із вказівкою географічних зон їх розповсюдження;

– *диференціація матеріалів*: розрізнення матеріалів із схожими спектральними характеристиками;

– *відображення поверхні*: відображення особливостей поверхні, що не розрізняється на інших знімках.

Сфери застосування гіперспектральних знімків:

• *розвідка корисних копалин* (складання літологічних карт; складання геоботанічних карт, ресурсно-сировинне картографування, ідентифікація мінералів, встановлення коридорних аномалій тощо);

• *сільське господарство* (оцінка стресових впливів на сільськогосподарські культури, прогноз урожайності, моніторинг ґрунтів, оцінка впливу сільськогосподарської діяльності на навколишнє середовище);

• *лісове господарство* (лісова таксація, лісова хімія тощо);

• *моніторинг морських і узбережних вод* (моніторинг інфраструктури морських портів, стану їх акваторії, вплив землекористування і річних стоків, моніторинг евтрофікації і поширення шкідливих водоростей, моніторинг риболовних господарств і їх продуктивності, оцінка хлорофілу, фітопланктону, органічних сполук, що містяться у воді, моніторинг зважених наносів тощо);

• *моніторинг територій і навколишнього середовища* (моніторинг заболочених територій, управління і переробка шахтних відходів, моніторинг деградації земель і складання карт ґрунтів, оцінка кліматичних змін, оцінка фракцій снігового покриву, оцінка розміру кристалів, прогнозування танення снігу, екологічний моніторинг підприємств, моніторинг якості води, зсуву ґрунтів, моніторинг місць несанкціонованого збереження твердих побутових відходів, інвентаризація зелених насаджень, моніторинг стану і ремонту автомобільних доріг тощо);

• *збройні сили* (картографування рельєфу, виявлення цілей, виявлення мін і боєприпасів, що не розірвались, оцінка театру бойових дій тощо).

Результати гіперспектральної зйомки надзвичайно корисні для розв'язання завдань управління територіями, складних завдань з виявлення об'єктів, ідентифікації їх складу, процесів, що відбуваються в них, виділення відмінностей між дуже близькими класами предметів, оцінки біохімічних і геофізичних параметрів тощо, результати яких широко використовуються в моніторингу й управлінні станом об'єкта.

Гіперспектральні методи в геології дозволяють безпосередньо ідентифікувати більшість мінералів на підставі їх спектральних властивостей і таким чином складати первинні тематичні карти досліджуваної території.

Методи аналізу мультиспектральних та гіперспектральних зображень дозволяють інтегрувати й аналізувати всі зібрані дані для вибору перспективних площ або прогнозування родовищ.

Багатоспектральними і гіперспектральними сканерами зображення створюється послідовно рядками. Об'єкт сканується растровим способом за допомогою оптико-механічної системи. Потім випромінювання проходить крізь збірну оптичну систему та диспергувальні системи, після чого сигнали записуються. Багатоспектральні, а особливо гіперспектральні системи дають змогу одержувати значно більше інформації про об'єкт, що широко використовується під час інтерпретації зображень.

Сучасні багатоспектральні та гіперспектральні знімальні системи працюють за оптико-електронним способом отримання зображень.

6.2.5. Сканерні зйомки

Сканерні оптико-електронні системи з'явились у середині 70-х рр. XX ст. і до кінця 80-х рр. XX ст. майже повністю витіснили традиційні фотографічні і телевізійні системи. Сьогодні вони є основним джерелом даних ДЗЗ. Сканерні методи мають низку істотних переваг перед аерокосмічним фотознімання. У той час як спектральний діапазон знімань фотографічними способами обмежений видимим і ближнім інфрачервоним випромінюванням (0,400–0,900 мкм), сканерні методи передбачають знімання в широкому діапазоні спектра сонячного випромінювання – від ультрафіолетового до теплового ІЧ (0,300–1,400 мкм).

Сканерне зображення – впорядкований пакет даних яскравості об'єктів зондування, що передаються радіоканалами з супутника на Землю.

Сканерні оптико-електронні системи – це багатоелементні фотоелектричні приймачі випромінювання, які складаються з мініатюрних фотодіодів, з'єднаних в одномірні лінійки або двомірні матриці. Розмір окремого чутливого елемента приймача дуже малий – менше 0,01 мм. Найкращі зразки сучасних приймачів-лінійок включають понад десять тисяч, матриці – декілька мільйонів чутливих елементів. Цикл роботи цих детекторів достатньо складний: він включає вироблення відповідного електросигналу, інтенсивність якого пропорційна яскравості світла, що подіяло на приймач світла, запам'ятовування сигналу кожного елемента і їх послідовне зчитування. Керуючи зчитуванням, можна вибирати окремі

елементи або їх групи для одержання результуючого сигналу. Застосування багатоелементних фотоелектричних приладів для реєстрації випромінювання відкрило широкі перспективи створення геометрично і радіометрично точних багатозональних знімальних систем високого просторового розрізнення, які можна швидко адаптувати до зовнішніх умов знімання, що постійно змінюються.

Загальна чутливість фотоелектричних приймачів у декілька разів перевищує чутливість фотоплівки, що дозволяє здійснювати знімання при порівняно коротких витримках або більш низькій освітленості. Цінними їх властивостями є також чутливість до ІЧ випромінювання, можливість реєстрації більш широкого діапазону інтенсивності випромінювання, а також лінійна залежність між відповідним сигналом і випромінюванням, що подіяло.

Електронні сенсори генерують електричний сигнал, пропорційний загальній одержаній енергії. Сигнал з кожного детектора в масиві може бути записаний і передаватися за допомогою електронних пристроїв у цифровій формі (як серія чисел).

Зображення, отримане з сенсорного масиву (лінійки), складається з двомірної прямокутної матриці (растру) цифрових величин, які представляють рівні яскравості об’єкта дослідження. Кожна величина растру – піксель – репрезентує середню яскравість для ділянки поверхні, растру (рис. 6.18).

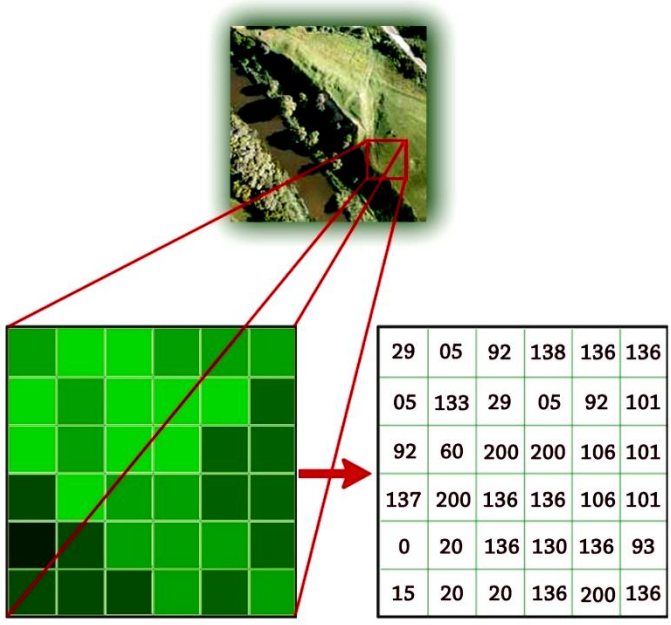


Рис. 6.18. *Подання цифрового зображення у вигляді матриці яскравості*

В оптико-електронних системах випромінювання потрапляє на відповідні датчики, які генерують електричний сигнал, що залежить від інтенсивності випромінювання.

Одноелементними датчиками оптико-електронних систем виступають фотомножники або фотодіоди. Щоб отримати зображення, потрібно з’єднати велику кількість одноелементних датчиків або сканувати об’єкт одним датчиком.

Перший варіант можна реалізувати на основі фотодіодів. Пристрій такого типу називається приладом з зарядовим зв'язком (ПЗЗ).

Конструктивно ПЗЗ є матрицею з ідентичних елементів, які можуть бути *лінійними* і *плоскими* (планарними).

Очевидні переваги цифрового знімання обумовили проведення в даний час активних робіт зі створення цифрових сканерних камер із фотоприймачами на базі матричних і лінійних ПЗЗ.

6.2.6. Інфрачервона та теплова зйомки

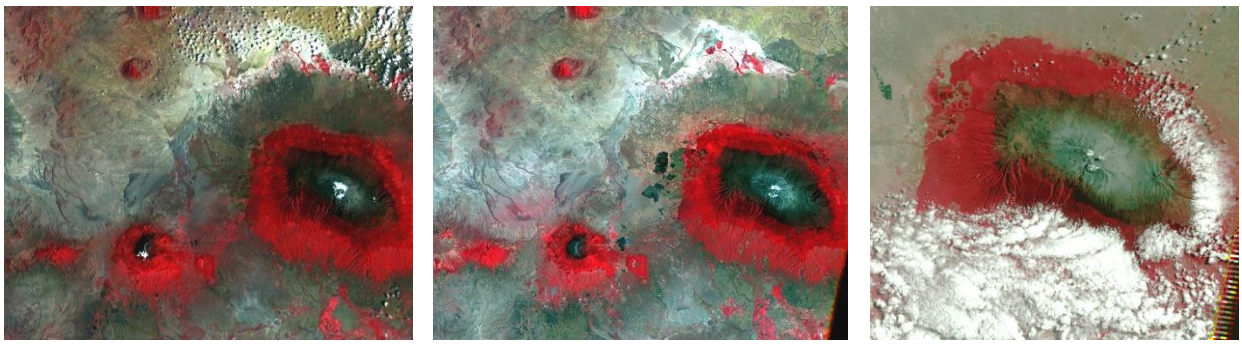
Теплове ІЧ випромінювання містить дуже особливу інформацію, яка не сприймається людським зором.

Знімальні системи, які забезпечують створення зображення об'єктів за їх власним тепловим випромінюванням, називають ІЧ або тепловими системами.

На відміну від зображень у видимій та БІЧ ділянках спектра, які створюються за рахунок відбивної здатності об'єктів, ІЧ зображення в СІЧ і ДІЧ ділянках створюються власним випромінюванням об'єктів і частково відбитим від них ІЧ випромінюванням інших джерел. ІЧ системи можна застосовувати в денний і нічний час, вони дають можливість за додатковими дешифрувальними ознаками не тільки розпізнати об'єкти, а й вивчати динаміку процесів і явищ (рис. 6.19).

Особливо це стосується розвитку міст, вивчення екологічних процесів та охорони довкілля.

Виконуючи зйомку з використанням приймачів теплового випромінювання (теплова зйомка), отримують теплові інфрачервоні знімки. Власне теплове випромінювання об'єктів свідчить про температуру їх поверхні. Зазвичай такі зображення подаються градаціями сірого кольору: темні ділянки відповідають більш низькій температурі спостережуваної поверхні, а світлі – більш високій.



Jan. 24, 1976, Landsat 2 (path/row 180/62) – Mount Kilimanjaro, Tanzania

Feb. 21, 2000, Landsat 7 (path/row 168/62) – Mount Kilimanjaro, Tanzania

Aug. 19, 2010, Landsat 5 (path/row 168/62) – Mount Kilimanjaro, Tanzania

Рис. 6.19. *Динаміка зміни снігів на горі Кіліманджаро в 1976, 2000 і 2010 рр. за знімками супутника Landsat*

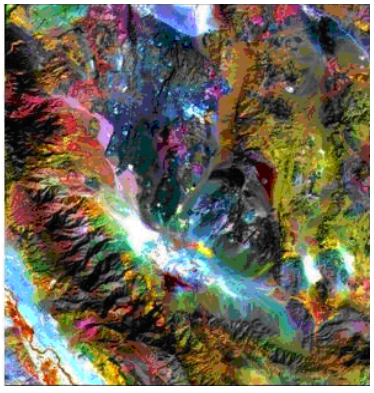
Око краще сприймає зміни колірного тону, ніж яскравості, тому нерідко для посилення контрасту зображення розфарбовують в гамму, яка природно асоціюється з температурною шкалою, – від фіолетового або синього ("холодні" кольори) до червоного або коричневого ("гарячі" кольори) (рис. 6.20).

Рис. 6.20. *Приклад знімка в тепловому діапазоні*

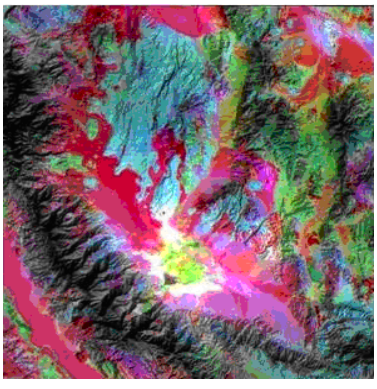
Теплові знімки широко використовуються для пошуку витоків тепла як на промислових установках і об'єктах (рис. 6.21), так і в районах житлової забудови (рис. 6.22).

На знімках, зроблених у ІЧ діапазоні, відображуються невидимі властивості об'єктів – температури поверхні води і ґрунту, її вологість, течії в океані. Так, на знімку Атлантичного океану чітко видно струмінь теплої течії Гольфстрім, що відбивається червоним кольором, який контрастує з холодними водами Північної Атлантики і Лабрадорської протитечії, на межі з якими утворюються величезні вихори.

Композиція видимого та ближнього ІЧ діапазонів, 30.03.2000 р. (композиція відображає розподіл рослинності, води, сполук заліза)



Композиція ближнього ІЧ діапазона, 30.03.2000 р. (композиція відображає розподіл карбонатів і сульфатів, пісковиків і вапняків)



Композиція ближнього ІЧ діапазона, 30.03.2000 р. (композиція відображає розподіл карбонатів, кварцу, вулканічних порід)

Рис. 6.21. *Приклади знімків у ближньому ІЧ діапазоні. Зображення Соляної Долини (США) (сенсор Aster)*

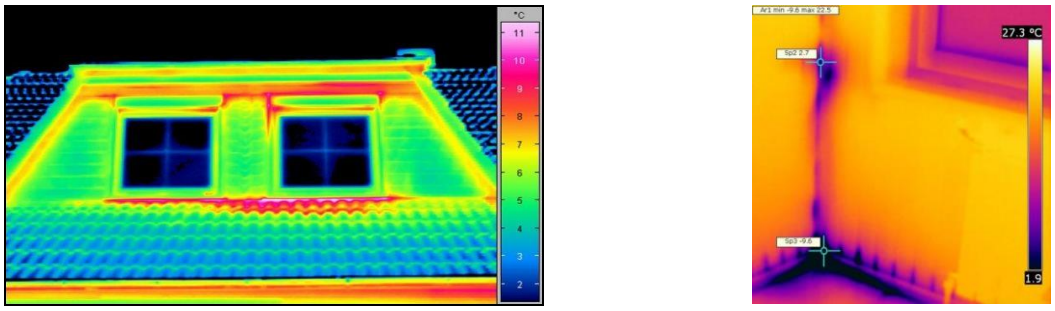


Рис. 6.22. *Приклад термограми, одержаної за допомогою тепловізора (використовуються кольори світлового діапазону для відображення різних значень температури)*

За такими знімками зручно вивчати динаміку водних мас. Зйомку в тепловому діапазоні можна виконувати як удень, так і в темряві. Проте хмарність заважає зйомці.

Знімки в тепловому діапазоні, за якими роблять висновки про температуру води в океані, використовують передусім для визначення районів, куди потрібно спрямовувати судна для риболовлі, тому що рибні косяки йдуть у прохолодні води.

Ці знімки можуть багато розповісти і про поверхню суходолу, наприклад, про вологість ґрунтів, оскільки сухі і вологі ґрунти мають різні температури. Добре виділяються на них і міста, де нагрів асфальту і будівель, промислові викиди підприємств впливають на температуру в місті.

Результати теплової зйомки поверхні Землі знаходять надзвичайно широке застосування в різних галузях: від вивчення та прогнозування глобальних кліматичних процесів і енергетичного балансу на основі моніторингу та картографування теплових полів Землі, температури морської поверхні з різним просторовим розрізненням, спостережень за вулканічною діяльністю (рис. 6.23), визначення складу гірських порід і пошуку корисних копалин, виявлення осередків займання і моніторингу лісових пожеж, до визначення стану підземних теплових мереж, картографування і діагностики стану нафто- і газопроводів.

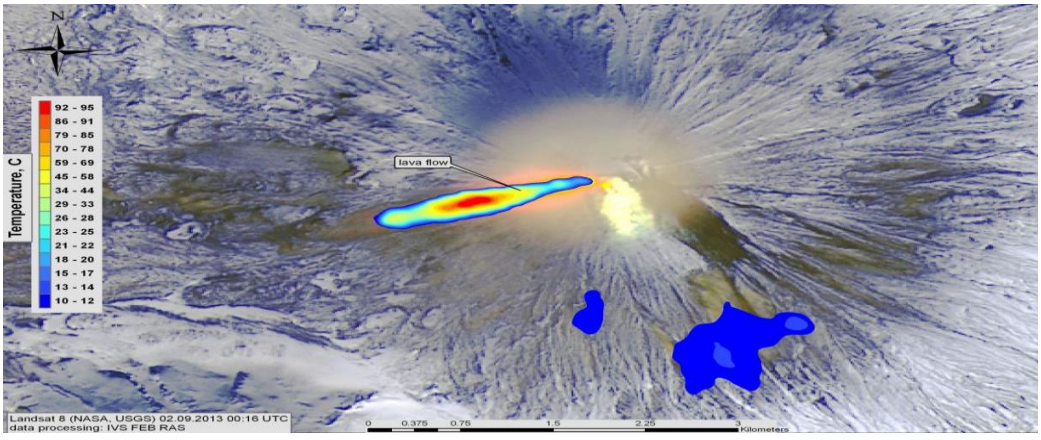


Рис. 6.23. *Розподіл температур (тепловий ІЧ діапазон). Ключевський вулкан. Супутниковий знімок Landsat 8, 02.09.2013 р.*

Останніми роками все більш широкого поширення набувають дослідження впливу "теплових островів" міських територій (*Urban heat island*), контроль викидів промислових відходів.

Сьогодні накопичено досвід використання ІЧ зйомки для дослідження дна шельфу. Цим методом за різницею температурних аномалій поверхні води отримані дані про будову рельєфу дна. При цьому використано принцип, згідно з яким при однаковому опромінюванні поверхні води на більш глибоких ділянках водних мас енергії на нагрів витрачається більше, ніж на мілководних.

Як наслідок температура поверхні води над більш глибокими ділянками буде нижчою, ніж над неглибокими. Цей принцип дозволяє на ІЧ зображеннях виділяти позитивні і від'ємні форми рельєфу, підводні долини, банки, гряди тощо. ІЧ зйомка сьогодні використовується для розв'язання спеціальних завдань, особливо в екологічних дослідженнях, пошуках підземних вод і в інженерній геології.

Теплові знімки також виявляються надзвичайно корисними в розвідці. Можна сховати під землю військовий завод, так що у видимому діапазоні нічого підозрілого не помітиш. Але оскільки при виробництві зазвичай виділяється значна теплова енергія, завод буде просто-таки світитися в ТІЧ діапазоні.

6.2.7. Радіотеплова зйомка

Радіотеплова зйомка (РТ-зйомка, пасивна радіолокаційна зйомка) заснована на реєстрації природного випромінювання в мікрохвильовому діапазоні (0,3–10 см). Теплові контрасти, що реєструються, обумовлені відмінностями випромінювання нагрітих тіл, які суттєво залежать від вологості, речовинного складу і текстурних особливостей гірських порід. Природне випромінювання реєструється спеціальною апаратурою чутливістю в десяті частини градуса в малому діапазоні азимутального кута.

Мікрохвильові радіометри дають змогу отримувати інформацію про місцевість через хмарне покриття, туман, що є безсумнівною перевагою цього типу знімальних систем. Роль оптичної системи в сканувальних мікрохвильових радіометрах відіграє спрямована антена, яка сканує місцевість перпендикулярно до польоту літального апарата. Мікрохвильові радіометри мають порівняно низьке просторове розрізнення, прямо пропорційне до висоти знімання і кутової ширини сканувального променя. Деякі з них працюють тільки за профілем (у площині орбіти КЛА), тобто подають інформацію в точці.

Майже повна прозорість атмосфери для хвиль цього діапазону робить ефективною РТ зйомку з космосу, але в зв'язку з її малою розрізненністю, наприклад у геології, вона використовується головним чином при регіональних дослідженнях.

6.2.8. Радіолокаційна зйомка

Останніми десятиліттями все ширше використовуються радіолокаційні або радарні системи. Радіолокаційні або радарні системи належать до активних систем, що працюють у сантиметровому чи метровому діапазоні ЕМХ. Їх використовують в умовах, коли об'єкти зондування закриті хмарами, туманом, димовими завісами тощо у будь-який час доби.

Хмари не є перешкодою під час радіолокаційної зйомки. Сутність зйомки полягає в посиланні радіосигналів певної частоти, які виробляє генератор, і фіксації часу повернення сигналів у приймач. Час повернення сигналів залежить від відстаней до об'єктів (рис. 6.24).

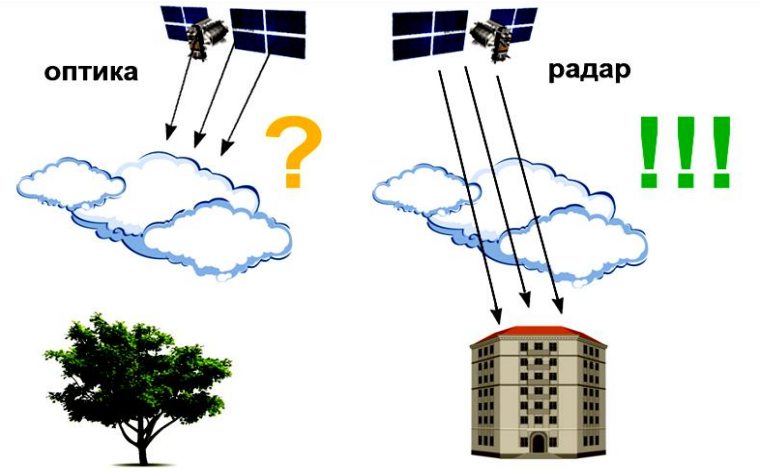


Рис. 6.24. *Особливості оптичної і радарної зйомки*

Радіолокаційна зйомка – це виявлення об'єктів, що відбувається за рахунок опромінення поверхні електромагнітними хвилями й отримання відбитих імпульсів.

На борту носія (літака або супутника) встановлюється радіолокатор – активний мікрохвильовий датчик, здатний передавати і приймати поляризаційні радіохвилі в заданому діапазоні частот електромагнітного спектра.

Залежно від радіохвиль виділяють такі діапазони зйомки:

• *L-діапазон* характеризується великою довжиною хвилі й істотною глибиною проникнення крізь підстильну поверхню, але порівняно невисоким просторовим розрізненням;

• *X-діапазон* має невисоку здатність проникнення, однак знімки, зроблені на X-частотах, мають високе розрізнення;

• *C-діапазон* є компромісом між короткими і довгими хвилями, дозволяє розв'язувати широкий спектр завдань.

Активне радіолокаційне зондування виконується за схемою: випромінювання імпульсу електромагнітної енергії в радіохвильовому діапазоні – проходження цим імпульсом відстані до досліджуваних об'єктів – відбиття (поглинання) хвиль об'єктом, повернення відбитої енергії – реєстрація відбитого сигналу.

Параметрами повернутого імпульсу енергії, що реєструється, є: час (відстань) проходження імпульсу від генератора до приймача випромінювання, інтенсивність прийнятого сигналу, дислокація опроміненого об'єкта в системі координат радіолокатора. В результаті радіолокаційної зйомки формується зображення місцевості, що реєструється на ЕПТ або машинних носіях.

Розгортка сигналу виконується за принципом сканера, тобто перехід від одного рядка до іншого відбувається за рахунок переміщення носія. Кількість енергії, що повертається на антену локатора, називається "зворотним розсіюванням".

Кожен піксель радіолокаційного знімка показує сумарний коефіцієнт відбиття даної ділянки поверхні, або потужність сигналу, що повернувся до антени. Відстань до цілі (range) визначається за часом проходження хвилі до об'єкта і назад.

За типом конструкції розрізняють радіолокаційні системи:

– бокового огляду;

– із синтезованою апертурою антени.

Ці системи дають можливість одержувати знімки з різним просторовим розрізненням.

РЛС бокового огляду випромінює вузькоспрямований короткий радіоімпульс у напрямку, перпендикулярному до руху носія під певним кутом до нормалі (рис. 6.25).

Розрізнення РЛС бокового огляду тим більше, чим більше розкривання антени і її довжина. Довжина антени обмежується розмірами літака. Відбитий від об'єкта сигнал приймається тією ж антеною, і після посилення й обробки подається на фотореєстратор. Положення елемента зображення рядка визначається часом пробігу радіолокаційного імпульсу від РЛС до об'єкта і назад. На цьому принципі заснована побудова рядка зображення. Кадр розгортається за рахунок руху літака.

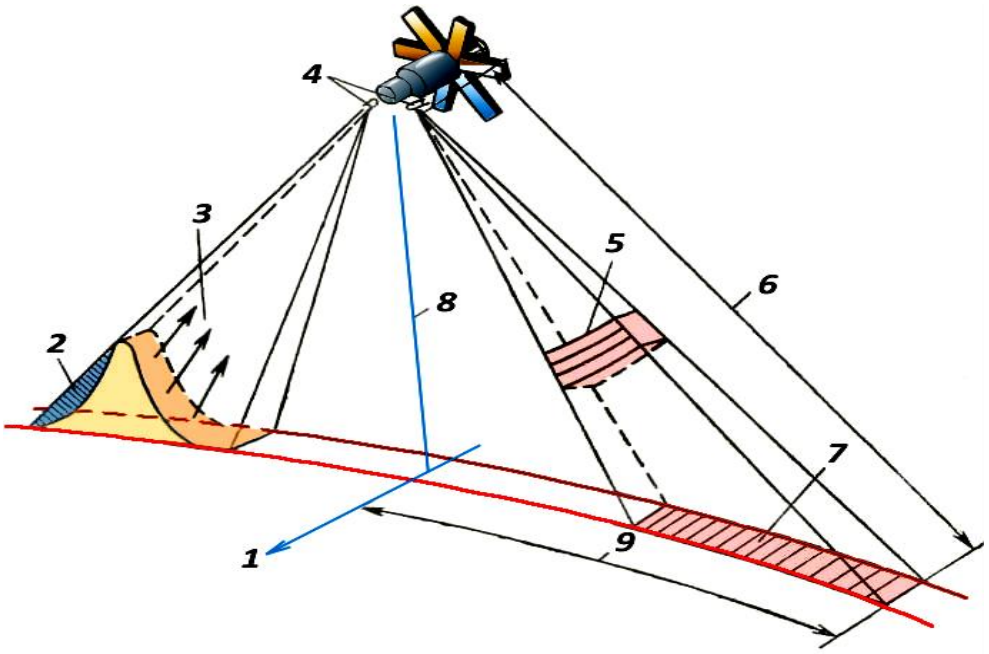


Рис. 6.25. *Схема зондування радіолокаційною системою бокового огляду: 1 – напрямок польоту; 2 – зона радіотіні (нульової інформації); 3 – відбиті сигнали; 4 – антена; 5 – імпульс радіохвиль; 6 – нахильна дальність; 7 – поверхня відбиття сигналу; 8 – місцева вертикаль; 9 – горизонтальна дальність*

Про властивості об'єктів судять за потужністю і структурою відбитого сигналу. Об'єкти частково поглинають, частково пропускають, частково відбивають і розсіюють радіохвилі, що падають на них, у співвідношеннях, що визначаються діелектричними властивостями матеріалів самих об'єктів. На знімках об'єкти, що мають світлі тони, мають великий коефіцієнт ефективного поверхневого розсіювання, на відміну від об'єктів з темним фототоном.

Радіолокаційне зондування в НВЧ діапазоні має низку унікальних можливостей, недоступних для приладів зондування у видимому й ІЧ діапазонах. Найголовнішою перевагою є можливість обстеження поверхневих утворень.

Ця властивість часткової прозорості є характерною для більшості природних об'єктів у НВЧ діапазоні. Глибина проникнення радіолокаційного променя визначається втратами, пов'язаними з поглинанням і розсіюванням ЕМВ. Наприклад, для сухого піску або ґрунту глибина проникнення може становити декілька метрів.

Глибина проникнення радіолокаційного імпульсу в ґрунт дуже залежить від об'ємного вмісту в ньому води, причому зі збільшенням її вмісту глибина проникнення експоненційно знижується.

Використовуючи РЛС бокового огляду з різними довжинами хвиль, можна одержати розподіл приповерхневої вологості для досліджуваного району. Текстурні неоднорідності радіолокаційного знімка можуть бути тонкосітчастими, смугастими, масивними тощо.

Особливо добре фіксується на радіолокаційних знімках гідромережа. Вона дешифрується краще, ніж на аерознімках. Високе розрізнення характерне і для районів, вкритих густою рослинністю. Розрізненність знімків становить від 10 до 200 м.

Просторова розрізненність зображень, отримуваних за допомогою РЛС БО, залежить від розміру імпульсу, сформованого в напрямку, перпендикулярному до польоту, і тривалості імпульсу. Чим менший розмір імпульсу за шириною і чим менша його тривалість, тим вища розрізненність радіолокаційного знімання.

Вузькоспрямований сигнал може формуватися при використанні великогабаритних антен, однак розмір антен обмежується через технічні можливості їх встановлення на космічному апараті. Тому доцільно використати антени (рис. 6.26) з синтезованою апертурою, коли малогабаритна антена персоніфікує собою начебто велику антенну споруду для прийому відбитих сигналів.

Радіолокаційне активне зондування має низку переваг на відміну від інших способів отримання дистанційної інформації. До них потрібно віднести: всепогодність, всесезонність, можливість роботи в будь-який час доби, високу чутливість до діелектричних властивостей об'єктів місцевості, можливість підповерхневого зондування, що зростає зі збільшенням довжин використовуваних хвиль. Зокрема, радіолокаційна зйомка використовується для пошуку води в пустелях на глибині декількох десятків метрів.

Одна з найяскравіших можливостей радіолокаційного методу зондування була продемонстрована ще в 2000 р. американськими астронавтами, які знаходились у космосі близько 10 днів.

На шатлі "Endeavour" стояли два локатори: один – на самому шатлі, інший – на виносній щоглі на відстані 60 м від шатлу (база 60 м – база вимірів, необхідна для отримання стереознімків). З двох антен одночасно випромінювався сигнал, відбивався і приймався з невеличкою затримкою, яка була обумовлена рельєфом земної поверхні.

Аналізуючи затримку фази (сигналу, що приймався двома антенами), будувався рельєф. Топографічна місія називалась SRTM – Shuttle radar topographic mission.

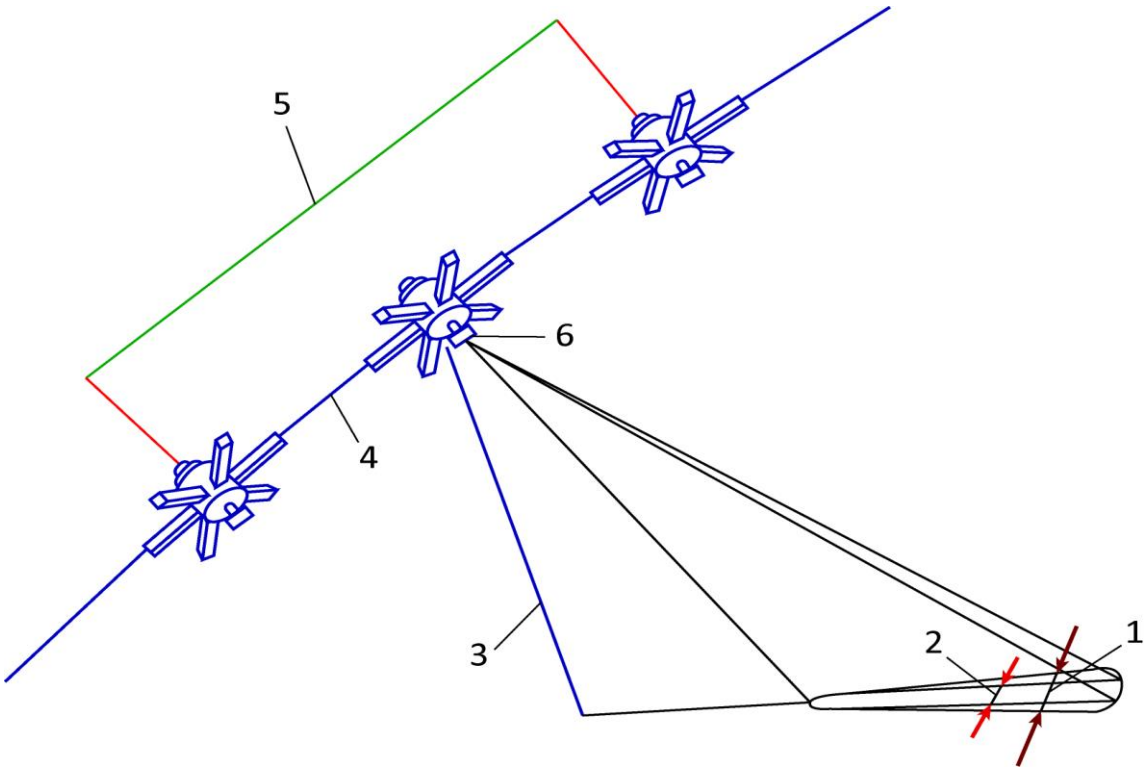


Рис. 6.26. *Схема роботи антени з синтезованою апертурою:*
1, 2 – діаграма променю (1 – реального, 2 – синтезованого);
3 – місцева вертикаль; 4 – напрямок польоту;
5 – синтезована антена; 6 – реальна антена РЛС

За період польоту було знято понад 80 % поверхні Землі, а деякі ділянки – по декілька разів. За даними цієї зйомки була створена високоточна тривимірна модель Землі (рис. 6.27).

Із дешифрування радіолокаційних зображень встановлено, що вони особливо ефективні для дослідження гідромережі, яка розпізнається значно краще, ніж на фотозображенні.

Недоліком радіолокаційних зйомок є більш низька метрична точність порівняно з аерофотозйомкою. Іншим недоліком є залежність від відбивних властивостей поверхні (наприклад, вологості).

При поступовій зміні цих властивостей радіолокаційні знімки однієї і тієї ж поверхні, що зроблені протягом різних періодів спостережень, можуть істотно відрізнятись, створюють певні складнощі при обробці через геометричні викривлення; певні труднощі можуть виникати при дешифруванні знімків; об’єм пам’яті, що займається такими даними, як правило, більший, ніж у даних інших типів.

Радарні знімки дозволяють виявляти на поверхні води нафту і нафтопродукти з товщиною плівки від 50 мкм (рис. 6.28).

Також варто зазначити, що дані, які одержуються у мікрохвильвому радіодіапазоні, слугують джерелом унікальної інформації про підстильну земну поверхню. Вони дозволяють визначати вертикальні зміщення з високою точністю (до декількох міліметрів), що є альтернативою дороговартісним і працезатратним наземним вимірам.

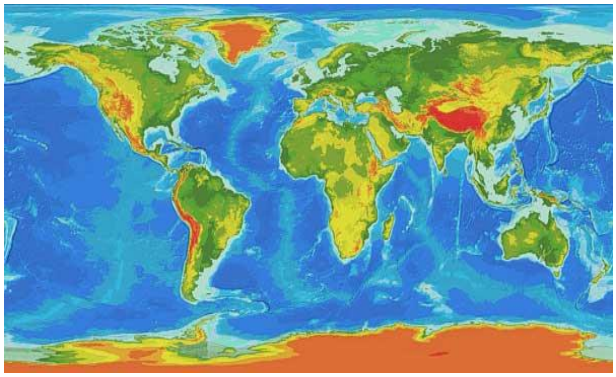


Рис. 6.27. *Цифрова тривимірна модель рельєфу Землі*

Рис. 6.28. *Виявлення на поверхні води нафти і нафтопродуктів за допомогою радарних знімків*

У надвисокочастотному діапазоні радіохвиль, у якому працюють радари, характер відбиття залежить головним чином від механічних властивостей поверхні, її гладкості і текстури.

Інше застосування радарних знімків – оцінка вологовмісту ґрунтів.

6.2.9. Лазерна і лідарна зйомки

У сфері моніторингу земної поверхні, інженерних вишукувань для будівництва лінійних та площинних об’єктів, створення та ведення кадастрових планів різного призначення щораз більшого значення набувають лазерні знімальні системи, які встановлюють на літаках.

Лазерне сканування – це сучасна технологія для збору геопросторових даних про рельєф та об’єкти місцевості, яка характеризується значною швидкістю отримання даних, їх високою точністю, детальністю та продуктивністю робіт, незалежністю від часу доби чи пори року, доступом до важкодоступних місць, широким спектром застосування цих даних тощо.

За допомогою лазерних знімальних систем одержують зображення за рахунок відбитої від земної поверхні "хмари точок" з відомими координатами *X, Y, Z.* Після їх оброблення отримується цифрова модель місцевості (ЦММ), яку ще називають цифровою моделлю рельєфу (ЦМР), та цифрова модель поверхні (ЦМП), що відповідає верхівкам всіх об’єктів, які знаходяться над поверхнею Землі.

Значна щільність точок лазерного сканування дозволяє детально визначити форму та розміри об’єктів місцевості, а також їх точне місцерозташування.

Ця інформація є цінною для виявлення змін як природніх, так і антропогенних об'єктів. Залучення відомостей про наявні на місцевості об'єкти та їх атрибутивних характеристик із баз геоданих і додаткових даних, наприклад, панхроматичних та багатоспектральних супутникових зображень, значно пришвидшує процес ідентифікації об'єктів в автоматичному режимі з мінімальним залученням операторів.

Особлива роль належить лазерним системам у побудові цифрових моделей рельєфу на принципі вимірювання відстаней від оптичної системи лазера до точки земної поверхні.

Принциповим в отриманні зображень у лазерному зніманні є підсвічування місцевості променем лазера. Промінь від лазера розгортальний пристрій скеровує на місцевість; відбитий промінь за допомогою оптичної системи скеровується в приймач випромінювання, де перетворюється на електричний сигнал.

Лазерні знімальні системи працюють у видимому та найчастіше в інфрачервоному діапазонах електромагнітного спектра. На борту літака лазерну систему встановлюють так, щоб вісь пристрою розгортки збігалася з напрямком польоту. Розгортка променя лазера вздовж рядка здійснюється поворотом дзеркала, розгортка по кадру – за рахунок руху літака.

Основні сфери застосування лазерної зйомки:

– вимірювання концентрації речовин, що містяться в атмосфері і пов'язані з її забрудненням;

– визначення термічних, структурних і динамічних характеристик атмосфери, океану і підстильної поверхні;

– виявлення граничного (критичного) вмісту різних речовин в атмосфері (вуглекислого газу, окису азоту і двоокису сірки);

– моніторинг за динамікою шлейфів промислових викидів;

– розпізнавання і виділення в океані зон розповсюдження фітопланктону з метою виявлення косяків риб, а також виявлення нафтових плям.

Лідарна зйомка (англ. *Light Detection and Ranging*) – технологія отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем (лазерів), що використовують, зокрема явища відбиття світлових променів від поверхні Землі з проведенням високоточних вимірів *X, Y, Z* координат.

Усталений переклад терміна LIDAR як лазерний радар є не зовсім коректним, оскільки в системах ближнього радіуса дії, наприклад призначених для роботи в приміщеннях (головні властивості лазера – когерентність, висока щільність та миттєва потужність випромінювання не затребувані, випромінювачами світла в таких системах можуть слугувати звичайні світлодіоди). Однак в основних сферах застосування технології (дослідження атмосфери, геодезія і картографія (з радіусами дії від сотень метрів до сотень кілометрів), застосування лазерів є необхідним.

Лідари – лазерні локатори, що працюють у видимому або ближньому ІЧ діапазонах хвиль.

Лідар є приладом активного зондування, подібним до мікрохвильового радара, який працює на іншій ділянці спектра – від ультрафіолетового до ближнього інфрачервоного.

Лідарна зйомка заснована на безперервному одержанні відгуку від поверхні відбиття, що підсвічується лазерним монохроматичним випромінюванням з фіксованою довжиною хвилі.

Перший орбітальний лідар був виведений на орбіту NASA у грудні 1994 р. у рамках програми LITE (Lidar In-Space Technology Experiment).

Ефективність методів лазерного зондування спричинила розробку великого класу лазерних лідарних систем дистанційного зондування: лазерних радарів – когерентних лідарів; аерозольних лідарів, лазерних флуорометрів, лазерних батометрів, лазерних імпульсних альтиметрів тощо.

Лідар як прилад є активним світловіддалеміром оптичного діапазону (рис. 6.29).

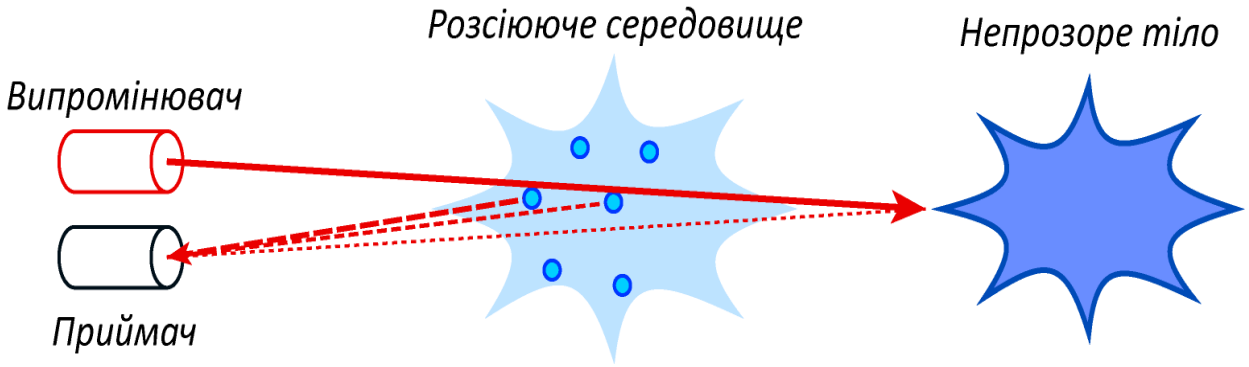


Рис. 6.29. *Принцип роботи лідарної зйомки*

Одним із його компонентів є лазер, який імпульсами або безперервно генерує випромінювання, що проходить крізь коліматор. Інший компонент (оптична система) збирає відбите випромінювання і фокусує його на детекторі (рис. 6.30).

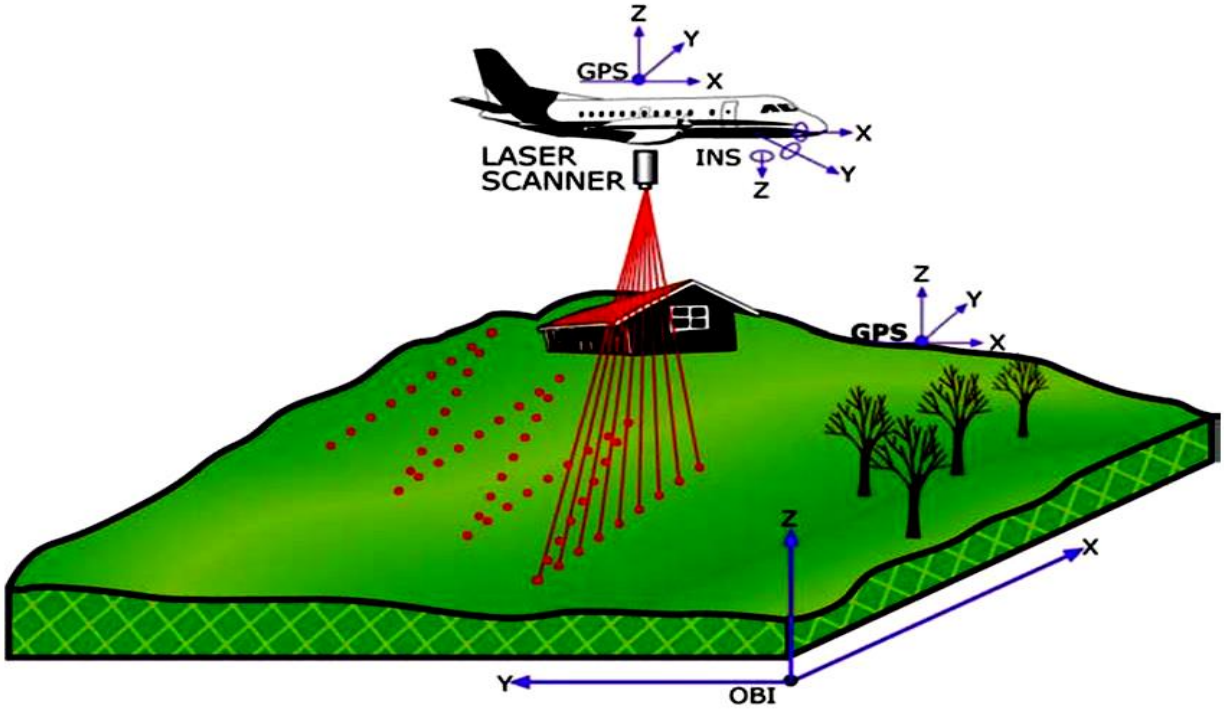


Рис. 6.30. *Схема лідарної зйомки*

Через поглинання атмосферою коротких хвиль, що використовуються в лідарі, він ефективно працює тільки при ясному небі. Проте це прилад з більш високою розрізненністю, ніж мікрохвильовий радар.

Основними компонентами апаратного забезпечення лідара є: носій (літак, гвинтокрил, штатив), система лазерного сканування, GPS і INS (внутрішня система позиціонування), яка вимірює крен, тангаж та рискання системи. Лазерні імпульси, що випромінюються лідаром, відбиваються як від об'єктів, що знаходяться на поверхні землі, так і від об'єктів, що знаходяться над землею: від рослинного покриву (рис. 6.31), будівель (рис. 6.32), мостів тощо. Один лазерний імпульс може відбиватись і повертатись до сенсора як один раз, так і декілька. Будь-який лазерний імпульс зазнає декілька віддзеркалень при його русі до земної поверхні, поділячись на стільки частин, від якої кількості поверхонь він відбився. Спільно з інформацією про внутрішнє і зовнішнє позиціонування (GPS і INS) ці відстані перетворюються на тривимірні точки, що відбивають поверхню відбиття лазерних імпульсів.

Точкові дані піддаються наступній обробці після збору з урахуванням діапазону часу роботи лазера, кута сканування, координат GPS, інформації про внутрішнє позиціонування (INS), що дозволяє отримати точні координати *x, y, z*.

Лазерні імпульси, що випромінюються лідаром, відбиваються як від об'єктів, що знаходяться на поверхні землі, так і від об'єктів, що знаходяться над землею: від рослинного покриву (рис. 6.31), будівель (рис. 6.32), мостів тощо. Один лазерний імпульс може відбиватись і повертатись до сенсора як один раз, так і декілька. Будь-який лазерний імпульс зазнає декілька віддзеркалень при його русі до земної поверхні, поділяючись на стільки частин, від якої кількості поверхонь він відбився.

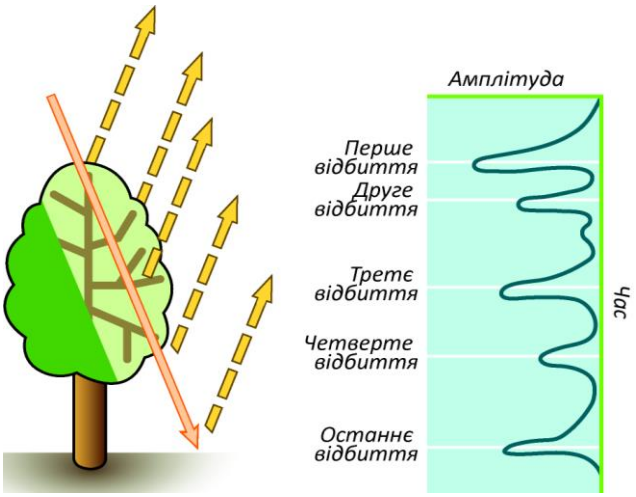


Рис. 6.31. *Схема відбиття лазерного імпульсу від об'єктів рослинності*

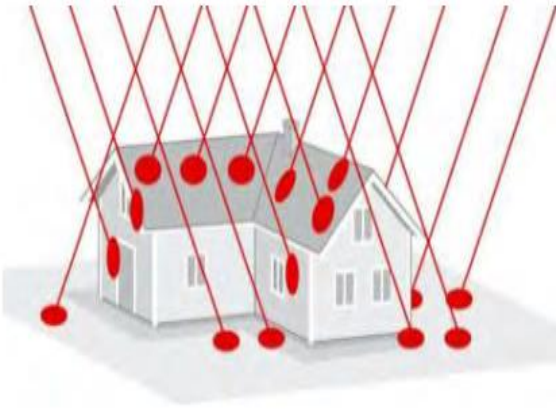


Рис. 6.32. *Схема відбиття лазерного імпульсу від об'єктів забудови*

Перший повернений сигнал є найбільш показовим і буде відповідати найвищому об’єкту ландшафту, такому як, наприклад, верхівка дерева або дах будівлі. Перший відбитий сигнал може також відповідати і земній поверхні. У цьому разі лідаром буде захоплене тільки одне відбиття.

Велика кількість повернень використовується для одержання висот об’єктів, що знаходяться на шляху лазерного імпульсу. Відбиті сигнали з середини "спектра" зазвичай відповідають рослинності, а останні відбиті сигнали використовуються для моделей власне поверхні Землі.

Дані лідарної зйомки є наборами даних, що містять хмари точок. Хмари точок – оброблені і просторово організовані дані лазерної зйомки. Конкретні поверхні, що відбили сигнал, класифікуються після первинної обробки хмари точок. Висоти земної поверхні, будівель, покриву лісу, шляхопроводів та інших об’єктів, з якими стикається лазерний промінь, складають дані хмари точок (рис. 6.33).

Кількість даних, що знімаються, – приблизно 1 точка на кілька квадратних метрів, або інакше кажучи – відстань між сусідніми точками не перевищує 2,5 м. Точність даних, що знімається при цьому, настільки висока, що похибка не перевищує 10–12 см!

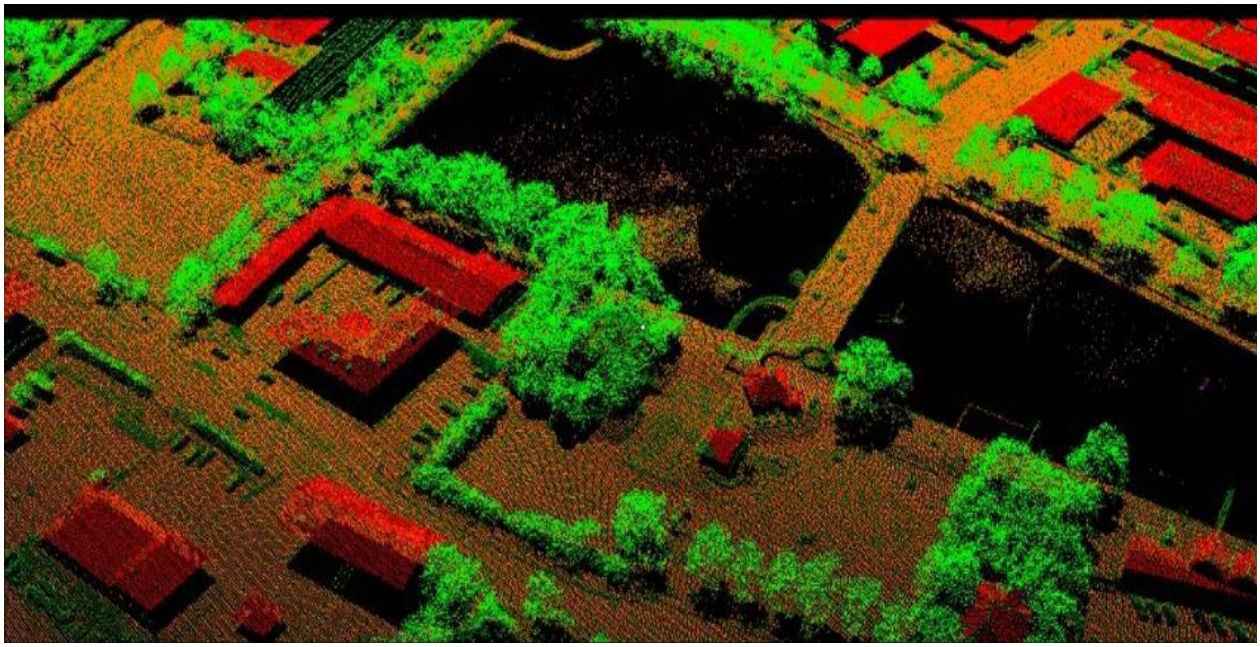


Рис. 6.33. *Приклад хмари точок*

Апаратура здатна відправляти близько 100 тисяч імпульсів щосекунди, і кожний з них, приходячи назад на сканер, дає точні координати точки, від якої відбився. Результатом стає тривимірна картинка, яка може досягати точності в декілька сантиметрів у плані і близько десяти сантиметрів за висотою. Отже, утворюється так звана "хмара точок" лазерного відбиття. При цьому для кожної точки цієї "хмари" відоме її місце розташування у просторі (координати) і висота.

Точкові дані після збору зазнають наступної обробки з урахуванням діапазону часу роботи лазера, кута сканування, координат GPS, інформації про внутрішнє позиціонування (INS), що дозволяє отримати точні координати *x, y, z*.

На разі створені лідари трьох типів: висотомір, який дозволяє будувати профілі, сканувальний лідар, який можна використовувати як інструмент для картування, і третій тип лідара – для спектрометричних досліджень і створення карти розподілу речовин, що забруднюють атмосферу.

На даний час найбільш популярними у світі є аерознімальні лідари Optech ALTM 3100, Leica ALS-50, IGI LiteMapper 2800 та TopoSys Fallcon.

Існує два основні типи систем лазерної зйомки: наземна й аерозйомка.

Під час аерозйомки система встановлюється на літак або гвинтокрил. Потік інфрачервоного лазерного випромінювання спрямовується в бік Землі, відбивається і потрапляє назад на рухомий сенсор бортового лазерного локатора.

Існує два основні типи аеросенсорів: *топографічний* і *батиметричний*.

Топографічний лідар використовується для отримання моделей поверхні для їх використання в різних сферах діяльності, таких як, наприклад, лісове господарство, гідрологія, геоморфологія, містобудівництво, ландшафтна екологія, гідротехнічні роботи, оцінка точності вишукувань та об’ємні розрахунки. Приклад застосування лідара для виміру місячної топографії, виконаний з космічного апарату Клементина, подано на рис. 6.34.

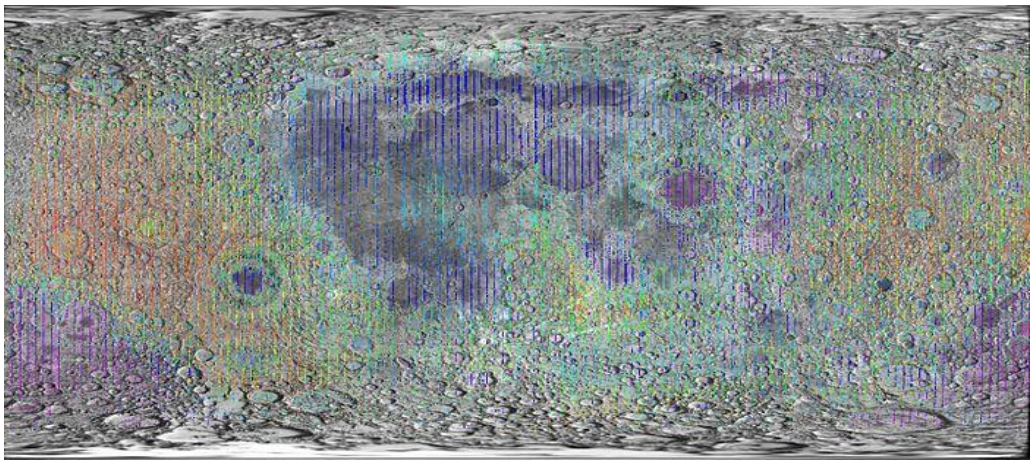


Рис. 6.34. *Вимір місячної топографії, виконаної з космічного апарата Клементина*

Батиметричний лідар – тип аерозйомки крізь товщу води. Більшість батиметричних лазерних систем здатні одночасно збирати дані про висоту і глибину, що дозволяє виконувати лазерну аерозйомку як земної, так і водної поверхонь. Під час зйомки батиметричним лідаром інфрачервоне світло (традиційної лазерної установки) відбивається від земної або водної поверхні і повертається до літального апарату, тоді як випромінювання додаткового зеленого лазера проникає крізь товщу води (рис. 6.35).

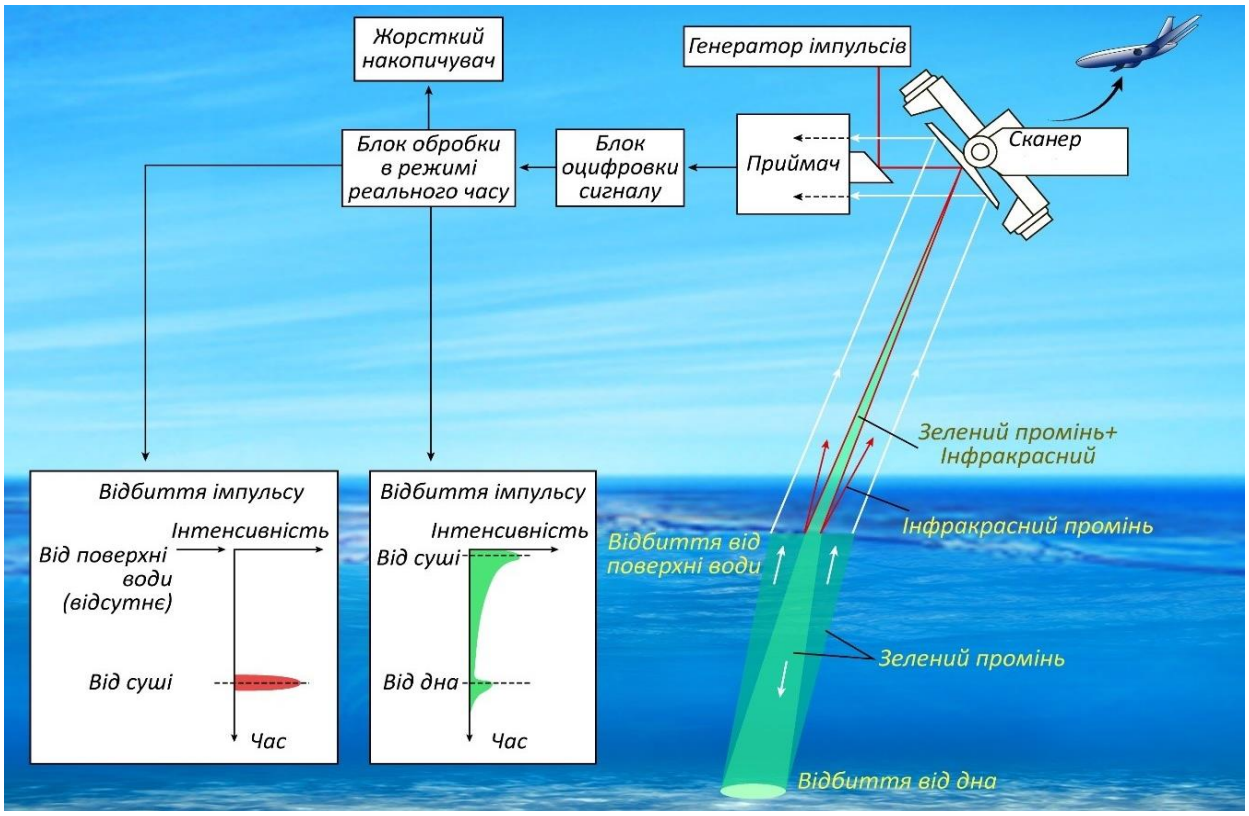


Рис. 6.35. *Приклад двопроменевого батиметричного сканування*

Аналіз двох різних імпульсів використовується для визначення водних глибин і висот берегових об’єктів суші. Батиметрична інформація виявляється дуже важливою для дослідження територій, що розташовані біля берегової лінії, портів, мілин. Також батиметрична інформація використовується для розміщення об’єктів на дні океану.

Наземний лідар. Існує два основні види наземних лідарів: *мобільній* і *стаціонарний*. При мобільній зйомці система лідара встановлюється на рухомий транспортний засіб. При стаціонарній зйомці система лідара зазвичай встановлюється на штатив або інший нерухомий об’єкт. Обидві установки обладнані безпечними для очей лазерними установками.

Система наземної лазерної зйомки дозволяє отримувати дуже густо розташовані точки, що мають високі характеристики точності, які дозволяють з високою точністю ідентифікувати об’єкти. Такі щільні хмари точок можна використовувати для керування спорудами та обладнанням, обстеження автомобільних і залізничних доріг і навіть для створення тривимірних моделей міста, включаючи моделі не тільки міської забудови, але й внутрішніх приміщень будівель і споруд.

Мобільний лідар – це створення набору хмар точок лазерної зйомки, яке виконується з використанням рухомої знімальної платформи. Системи мобільного лідара можуть включати різну кількість сенсорів, встановлених на транспортному засобі, що рухається. Такі системи можуть бути встановлені на автомобілях (рис. 6.36), потягах, морських і річкових суднах. Мобільні системи, як правило, складаються з лазерного сенсора, камер, GPS та INS (внутрішньої навігаційної системи), аналогічно до тих тем, що використовуються при лазерній аерозйомці.

Мобільний лідар може використовуватися для аналізу придорожньої інфраструктури, пошуку пошкоджень ліній електропередач, розташування освітлювальних щогл, а також дорожніх знаків уздовж автомобільних і залізничних шляхів.

Стаціонарний лідар – це створення набору хмар лідарних точок, отриманих із статичного положення. Зазвичай сенсор лідара встановлюється на штатив і має повністю автономну лазерну і фото-знімальну систему (рис. 6.37).

Рис. 6.36. *Приклад сканувального лідара безпілотного автомобіля*

Рис. 6.37. *Лідар Leica, що використовується для сканування будівель, скельних утворень тощо для створення 3D-моделей.*

Такі системи можуть отримувати хмари точок, здійснюючи лазерну зйомку як усередині будівель і споруд, так і ззовні. Цей тип лідарної зйомки зазвичай застосовується при здійсненні інженерних вишукувань, геодезичної зйомки і археології.

Питання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте методи і способи одержання інформації при дистанційному зондуванні.

2. Охарактеризуйте візуальні і візуально-інструментальні способи спостереження.

3. Охарактеризуйте фотографічні і телевізійні способи одержання інформації.

4. Охарактеризуйте спектрометричні способи одержання інформації.

5. Охарактеризуйте гіперспектральні способи одержання інформації.

6. Охарактеризуйте інфрачервоні і теплові способи одержання інформації.

7. Охарактеризуйте радіотеплові способи одержання інформації.

8. Охарактеризуйте радіолокаційні способи одержання інформації.

9. Охарактеризуйте лазерні і лідарні способи одержання інформації.

VII. КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ ДЗЗ

Людина вважається найдосконалішою істотою у Всесвіті тільки тому, що вона сама розподіляє місця в даній класифікації.
Віктор де Бравуа

Сучасний розвиток суспільства потребує точних і актуальних даних про території, природні ресурси та процеси і явища, що відбуваються в навколишньому природному середовищу. Серед усього розмаїття даних домінантне значення належить природним характеристикам місцевості, а саме геологічній будові, запасам поверхневих і підземних вод, типу і стану ґрунтів, флори і фауни, кліматичним і атмосферним особливостям тощо.

Найбільш прогресивним методом одержання і перетворення даних про об'єкти земної поверхні, явища і процеси, що відбуваються на її підстильній поверхні, над нею і під нею, без прямого контакту з об'єктом, є дистанційне зондування.

В ДЗЗ використовують причинно-наслідкові зв'язки між властивостями об'єктів і зображеннями цих об'єктів, одержаних за допомогою ЕМХ різної довжини.

Метою обробки даних ДЗЗ є розрізнення об'єктів або аналіз ситуацій, що склались, і визначення їх положення в просторі. Але оскільки форма, розміри, фізичні властивості об'єктів суттєво відрізняються, розроблено багато способів, методів та методик виконання процедур дистанційного зондування. На сьогодні не існує єдиного універсального підходу, прийнятного для розрізнення всіх об'єктів і ситуацій. У зв'язку з цим певний інтерес становить класифікація засобів ДЗЗ.

7.1. Загальні відомості про класифікацію систем ДЗЗ

Сучасний навколоземний простір налічує близько тисячі діючих космічних апаратів різного призначення та державної належності. Серед них – приблизно півсотні космічних апаратів ДЗЗ та ще більше метеорологічних і топогеодезичних космічних апаратів та КА видової розвідки, що формують іконічну інформацію методами ДЗЗ. У науковій та спеціальній технічній літературі використовуються різні назви та визначення таких космічних апаратів, що спричиняє неоднозначне тлумачення. На сьогодні, на жаль, не існує нормативно визначеної класифікації космічних апаратів (систем) ДЗЗ, а класифікація здебільшого здійснюється за окремими ознаками.

Класифікація (лат. *classis* – "розряд" + *facere* – "робити") ***систем ДЗЗ – це розподіл їх на класи (підкласи, групи) на основі спільності однорідних суттєвих ознак (властивостей), що фіксує закономірні зв'язки між класами систем у відповідній галузі знань.***

Для забезпечення можливості здійснення зйомки в ДЗЗ знімальна апаратура встановлюється на носій, який піднімає її на потрібну висоту, переміщує відносно земної поверхні і забезпечує певне орієнтування в просторі.

За визначенням Науково-технічного підкомітету Комітету ООН з космосу, ***ДЗЗ – це спостереження й вимір енергетичних і поляризаційних характеристик***

власного та відбитого випромінювання елементів суходолу, океану й атмосфери Землі в різних діапазонах ЕМХ, що сприяють опису розташування, характеру і часової мінливості природних параметрів і явищ, природних ресурсів Землі, навколишнього середовища, а також антропогенних об'єктів і утворень.

Системи ДЗЗ можна класифікувати за різними критеріями, такими як тип використовуваної енергії, тип платформи, на якій розміщені датчики, та сфера застосування. Загалом, ДЗЗ поділяють на активні та пасивні. Їх можна класифікувати на повітряні і космічні, однозональні і багатозональні.

З наведеного визначення випливає, що методи й засоби ДЗЗ мають різні класифікації: за спектральним діапазоном використовуваного ЕМВ; за типом сигналу, що реєструється; за параметрами зображень (просторовим і спектральним розрізненням, частотою огляду, розміром кадру на місцевості, оперативністю виконання зйомки, правами на розповсюдження та копіювання зображень); за характеристиками носіїв апаратури зйомки та її параметрів, за способом доставки на Землю тощо.

Аерокосмічну зйомку можна класифікувати за видами розрізнення й охоплення, за типом носія даних (фотографічні і цифрові), за принципом роботи сенсора (фотоефект, піроефект тощо), за способом формування (розгортки) зображення, за спеціальними можливостями (стереорежим, складна геометрія зйомки), за типом орбіти, з якої здійснюється зйомка, тощо. Геометричні параметри зображень та характеристики огляду визначально залежать від параметрів траєкторії КА та характеристик його бортової апаратури зйомки.

7.2. Класифікація систем ДЗЗ

7.2.1. Класифікація систем ДЗЗ за типом носія

За типом носіїв, що використовуються для систем ДЗЗ, їх поділяють на основні групи (рис. 7.1): *авіаційні* – літаки, гелікоптери, планери, мотодельтаплани, безпілотні літальні апарати, аеростати (дирижаблі та повітряні кулі), *космічні* – штучні супутники Землі та інших планет, орбітальні станції, міжпланетні апарати, *наземні та морські [72]*.

7.2.2. Класифікація систем ДЗЗ за побудовою зображення

За побудовою зображення космічні системи ДЗЗ поділяються на:

– *іконічні,* за допомогою яких будують зображення;

– *параметричні,* за допомогою яких можна одержувати певні характеристики місцевості.

У свою чергу, іконічні поділяються на:

1) *системи з одночасною побудовою зображення та одночасним його записом*. Типовим представником цієї групи є *фотографічні камери*;

2) *системи з одночасною побудовою зображення і неодночасним його записом*. Зображення будується одночасно, а його реєстрація ведеться елемент за елементом. Представниками цієї апаратури є телевізійні та оптико-електронні знімальні системи. В системах цього виду фактично сканується зображення;

3) *системи з поелементною побудовою зображення і таким самим записом (сканувальні)*.

Рис. 7.1. *Носії знімальних систем дистанційного зондування Землі [72]*

До цієї групи належить апаратура, яка працює на принципі сканування об'єкта. Це широкий клас знімальних систем оптико-механічного, інфрачервоного, лазерного, радіотеплового та радіолокаційного сканування.

7.2.3. Класифікація систем ДЗЗ за видом використовуваної знімальної апаратури

За видом використовуваної знімальної апаратури розрізняють зйомки:
– фотографічні (photography);
– телевізійні (television, photovision);
– фототелевізійні (phototelevision);
– сканерні (scanner);
– радіолокаційні (radar, radiolocation);
– гідролокаційні (sounding);
– лазерні (laser, optical maser) та лідарні (lidar).

Фотографічна зйомка – фотографування поверхні в усьому видимому діапазоні спектра або певній його частині, а також в інфрачервоному діапазоні. Широко застосовується під час повітряної та супутникової зйомки з метою одержання даних для створення та оновлення карт.

Телевізійна зйомка ("теле" – "далеко", а "візі" – "бачення") – отримання зображень місцевості на електронно-променевій трубці з наступним фотографуванням чи передачею аналоговими чи цифровими радіолініями на наземні пункти.

Телевізійна зйомка використовує головним чином видимий діапазон спектра і ближній ІЧ діапазон 0,8–1,1 мкм. Особливістю телезйомки порівняно з фотозйомкою є те, що зображення земної поверхні проєктується не на фотошар, а на приймальний пристрій – *відікон*.

Зображення відтворюється в режимі реального часу як безпосередньо на екрані приймача, так і з магнітних цифрових записів. Розрізнення телевізійних знімальних систем невисоке, тому їх використовують для розв'язання оглядових завдань, наприклад, оцінювання результатів стихійних явищ, повеней, катаклізмів тощо.

Телевізійні системи бувають:

– *сканерного типу* – розгортка зображення по рядку здійснюється електронним способом;

– *кадрового типу* – розгортка зображення по рядку здійснюється за рахунок переміщення носія.

Досить поширена багатозональна зйомка, що виконується у вузьких спектральних діапазонах.

Сканерна зйомка – зйомка поверхні за допомогою оптичних або багатоспектральних пристроїв – сканерів. Відмінність таких пристроїв від звичайних фотокамер полягає в тому, що сканер, рухаючись уздовж або упоперек маршруту зйомки, фіксує відбиття променя від поверхні і спрямовує його до об'єктива. Під час зйомки поверхні за допомогою сканера формується зображення з окремих елементів (пікселів), кожному з яких відповідає яскравість випромінювання ділянки поверхні.

Радарна зйомка – активний метод зйомки, заснований на випромінюванні в напрямку поверхні зйомки сигналу та прийому його відбиття. Зазвичай радарна зйомка здійснюється в радіодіапазоні за допомогою локаторів бокового обстеження (ЛБО). Перевагою цього методу є можливість виконання знімань у темну пору доби та незначний вплив на нього погодних умов: туману, хмарності. Радарна зйомка використовується для визначення форми поверхні (рельєфу) та вивчення її геологічної структури.

Теплова зйомка відбувається в ІЧ діапазоні і заснована на фіксації теплового випромінювання поверхні та об'єктів, зумовленого сонячним випромінюванням або ендогенними процесами, та виявленні аномалій. Теплова зйомка дозволяє виявляти елементи гідрографії, вивчати геологічну структуру поверхні, льодовий стан, вулканічну діяльність, температурну неоднорідність водного середовища, виявляти рельєф дна тощо.

Спектрометрична зйомка – вимірювання відбивної здатності поверхні чи шарів речовини. Проводиться в мікрохвильовому, видимому та ближньому ІЧ діапазоні.

Виділення робочих зон спектра (монохроматизація випромінювання) в спектрорадіометрах виконується за допомогою призм, дифракційних решіток,

інтерференційних світлофільтрів. Комплексний аналіз даних, отриманих у кількох спектральних інтервалах, дозволяє істотно підвищити інформативність зйомки. Можна виділити такі переваги спектрорадіометрів:

– можливість роботи у всьому оптичному діапазоні спектра;

– широкий динамічний діапазон (реєстроване випромінювання може змінюватись в інтервалі $1 \cdot 10^4$ і більше (у фотоплівки ~ 10^2);

– можливість роботи у вузьких інтервалах спектра (до кількох нанометрів; у фотоплівки спектральний інтервал, що реєструється, ~ 100 нм);

– реєстрація даних у форматі, сумісному з комп'ютером.

Лазерна (лідарна) зйомка – активна зйомка поверхні шляхом безперервної фіксації відбиття від поверхні, яка опромінюється монохроматичним лазерним випромінюванням із фіксованою довжиною хвилі.

Лідарна зйомка ведеться з носіїв із невеликою висотою польоту.

Окремо виділяють *аероспектрометрування* (aerial spectrophotometry, aerial radiometry), яке є реєстрацією за допомогою спектрографів спектральної яскравості (spectral brightness, spectral radiance) певної поверхні вздовж напрямку руху літального апарата.

7.2.4. Класифікація систем ДЗЗ за використовуваними орбітами

За використовуваними орбітами космічні системи ДЗЗ поділяються на [24; 30]:

– *низьковисотні* навколоземні орбіти пілотованих кораблів, космічних станцій та безпілотних КА, що створюють можливість проведення детальної зйомки з висоти польоту над поверхнею Землі 200–600 км;

– *середньовисотні* орбіти ресурсних і метеорологічних КА, що використовуються для оперативної, менш детальної, супутникової зйомки з висоти польоту над поверхнею Землі 600–1400 км;

– *геостаціонарні* орбіти КА, що використовуються для постійного спостереження за визначеним районом з висоти польоту над поверхнею Землі – 36 тис. км й більше.

До 80 % усіх космічних апаратів систем ДЗЗ рухаються на низькоорбітальних (200–1400 км), близьких до кругових, приполярних орбітах. Для оптико-електронних систем ДЗЗ ці орбіти, як правило, сонячно-синхронні.

7.2.5. Класифікація космічних систем ДЗЗ за масою

Класифікація космічних апаратів (КА) ДЗЗ за масою нормативно не визначена. На думку автора, доцільно використати класифікацію, запропоновану в праці [32]:

– *великі* – КА масою більше 1000 кг;
– *малі* – КА масою від 500 до 1000 кг;
– *мінісупутники* – КА масою від 100 до 500 кг;
– *мікросупутники* – КА масою від 10 до 100 кг;
– *наносупутники* – КА масою від 1 до 10 кг;
– *пікосупутники* – КА масою до 1 кг.

7.2.6. Класифікація космічних систем ДЗЗ за типом траєкторії

За характером траєкторії руху космічні системи дистанційного зондування Землі можна поділити на:

– *низькоорбітальні кругові (сонячно-синхронні, приполярні)* – висота 200–600 км. Використовуються для детальної зйомки з високою просторовою роздільною здатністю. Завдяки регулярним повторним проходам забезпечують глобальне покриття;

– *високоеліптичні орбіти (типу «Молнія», «Tundra»)* – з великим ексцентриситетом та нахилом ~63°. Орбіта «Молнія» була ще розроблена в 1960-х роках колишньому СРСР для стабільного зв'язку та спостереження в арктичних регіонах. Подібні орбіти («Tundra» – США, QZSS – Японія, сучасні арктичні комунікаційні місії) дозволяють довше утримувати супутник над певними ділянками, особливо на високих широтах;

– *геостаціонарні* – розташовані на висоті близько 36 тис. км. Забезпечують безперервний моніторинг однієї території та активно застосовуються у метеорології, телекомунікаціях і системах раннього попередження.

На практиці більшість супутників ДЗЗ використовують сонячно-синхронні низькі орбіти, тоді як геостаціонарні та високоеліптичні застосовуються для спеціалізованих завдань.

7.2.7. Класифікація систем ДЗЗ за використовуваними методами

За використовуваними методами системи ДЗЗ поділяються на [56]:

– *фотографічні* (одномоментні);

– *нефотографічні* – зйомки, що здійснюються за допомогою оптико-механічних сканерів або радарів бокового огляду, інформація з яких подається цифровим записом.

До фотографічних систем відносяться традиційні засоби фотозйомки й новітні системи багатозональної або мультиспектральної зйомки з використанням оптико-електронних матриць на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ-матриць).

До нефотографічних систем супутникової зйомки відносять оптико-механічні та оптико-електронні сканери й радіолокатори бокового огляду. Такі системи здійснюють огляд земної поверхні шляхом її послідовного сканування. Сканерні методи забезпечують реєстрацію ЕМВ в більш широкому діапазоні спектра (ультрафіолетовий, видимий, інфрачервоний та радіодіапазон) і можливість цифрового подання даних. Останнє суттєво розширює можливості їх передачі, зберігання та обробки. До нефотографічних часто відносять телевізійні методи на підставі того, що телевізійні системи зйомки формують зображення на екрані передавальної телевізійної трубки одномоментно, але зчитування його й подальше перетворення на електричні сигнали здійснюється шляхом послідовного сканування електронним променем.

Класифікацію методів аеро- та супутникової зйомки за спектральними діапазонами подано на рис. 7.2.

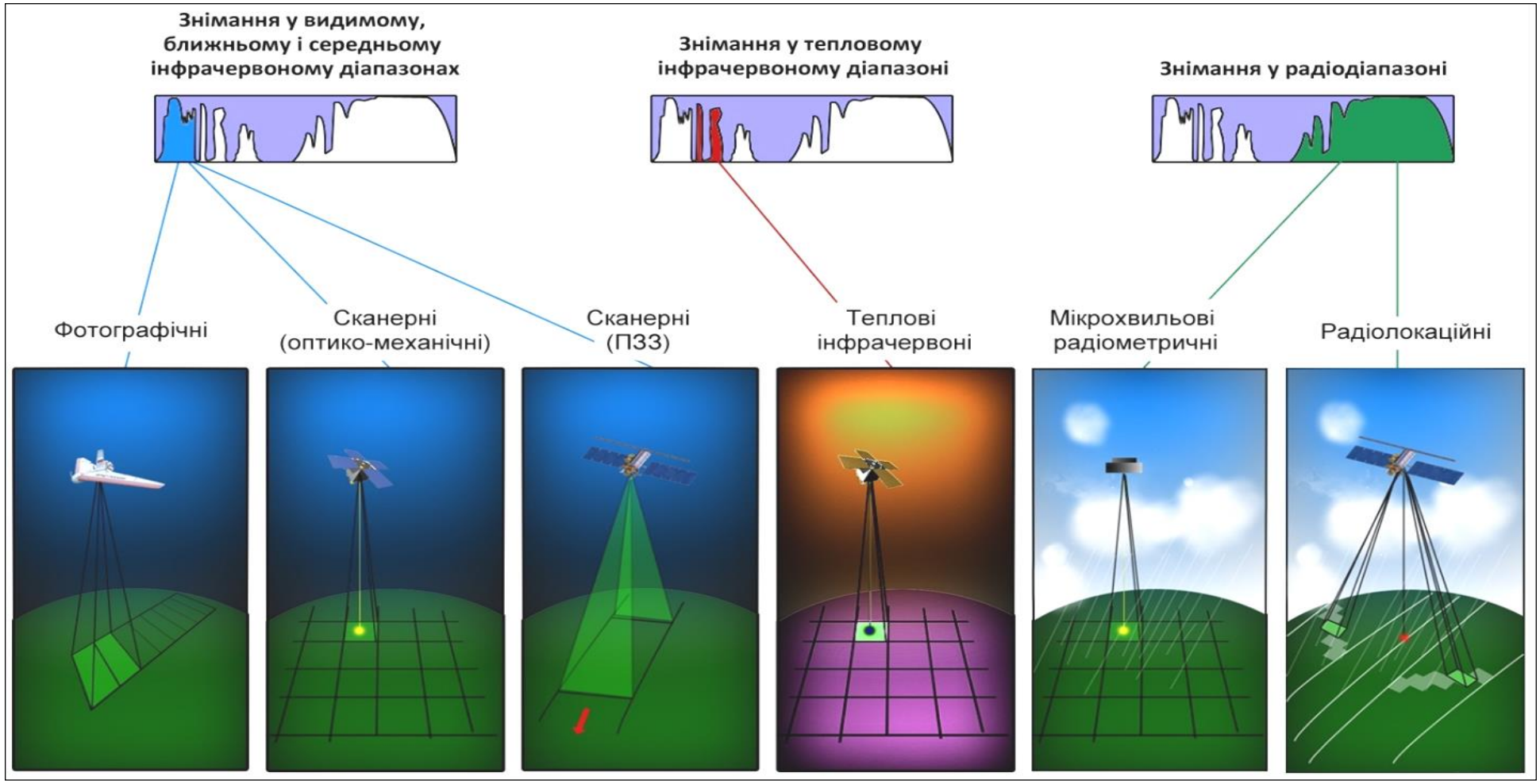


Рис. 7.2. *Класифікація методів аеро- та супутникової зйомки за спектральними діапазонами і технологіями одержання зображення*

7.2.8. Класифікація систем ДЗЗ за призначенням

За призначенням космічні системи ДЗЗ автори праць [5–7] пропонують класифікувати на системи інформаційного забезпечення:

– розв'язання наукових завдань;

– розв'язання господарських завдань;

– розв'язання питань національної безпеки й оборони;

– розв'язання тематичних завдань, а саме:

• *інвентаризації* сільськогосподарських угідь, виділення та ідентифікації типів сільськогосподарських культур, прогнозування врожаїв, аналізу сільськогосподарського потенціалу;

• *контролю глобальних атмосферних змін* – вимірювання температури поверхні, визначення стану поверхні, визначення стану атмосфери, спостереження за хмарними покривами, дослідження "парникового ефекту";

• *пошуку корисних копалин та енергоносіїв* (нафти, природного газу, вугілля);

• *топографічного картування*, створення й оновлення карт, спостереження за зростанням населених пунктів, контролю за станом ґрунтів і пасовищ;

• *спостереження за прибережними зонами океанами, контролю водних джерел* – вивчення й визначення океанських ресурсів, вимірювання товщини льоду, визначення снігового покриву та його водного еквівалента, виявлення місць і джерел забруднення акваторій;

• *КА контролю за станом лісів*, визначення типів лісонасаджень і домінуючих порід, оцінки запасів лісоматеріалів, лісозаготівлі;

• *КА моніторингу надзвичайних ситуацій* – їх запобігання, контролю й оцінювання наслідків повеней, пожеж і землетрусів;

• *КА спостереження в інтересах оборони* (видової космічної розвідки) – визначення стану військових, військово-промислових та інженерних споруд, стеження за прикордонними територіями, контроль за масовими пересуваннями військ тощо.

За галузевими ознаками ДЗЗ поділяється на *геологічне, іоносферне, біологічне, атмосферне, астрофізичне, екологічне, сільськогосподарське* тощо.

7.2.9. Класифікація систем ДЗЗ за оглядовістю

Здатність системи супутникової зйомки до охоплення території на знімках називають *оглядовістю*. Оглядовість космічної системи ДЗЗ залежить як від висоти орбіти носія апаратури зйомки (траєкторії польоту КА ДЗЗ), так і від характеристик цієї апаратури.

За оглядовістю КА ДЗЗ поділяють на класи [8–9]:

– *глобальної зйомки* оглядовістю 10^7–10^8 км^2, які забезпечують зображення усього або майже усього видимого диска Землі;

– *регіональної зйомки* оглядовістю 10^6–10^7 км^2, які забезпечують формування зображення великих географічних областей та держав;

– *локальної зйомки* оглядовістю 10^5–10^6 км^2, які забезпечують формування зображення окремих районів;

– *детальної зйомки* оглядовістю до 10^2–10^4 км^2, які забезпечують формування зображення окремих площинних об'єктів.

Просторова розрізненність є однією з основних характеристик космічних систем ДЗЗ. Вона визначає масштаб та детальність космічних зображень, що, в свою чергу, впливає на якість їх дешифрування, тобто на цінність знімків для цільового застосування.

Примітка. В літературі часто під розрізненністю оптико-електронних систем розуміють розмір проєкції одиничного елемента матриці ПЗЗ на Землі (GSD – ground sampled distance), що в загальному випадку не відповідає мінімальному розміру об'єкта дешифрування.

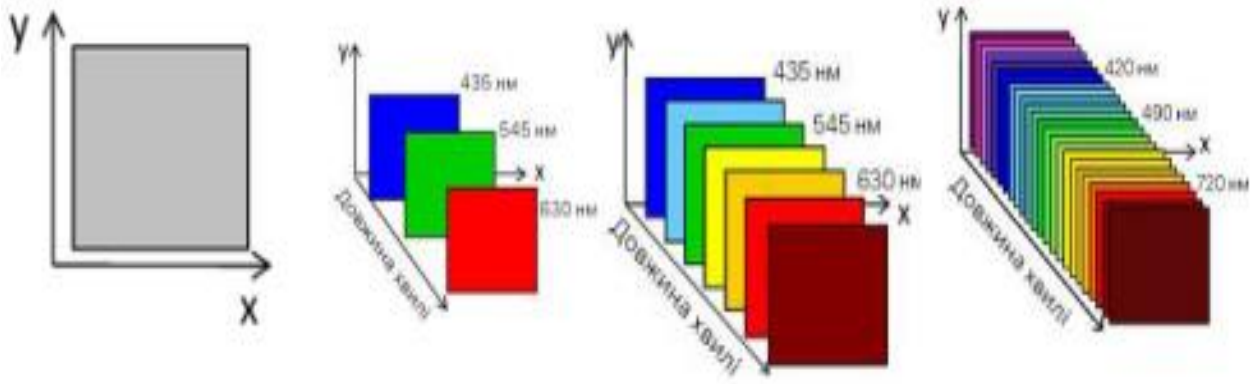
7.2.10. Класифікація космічних систем ДЗЗ за просторовою розрізненністю

Аналіз джерел науково-технічної інформації з тематики ДЗЗ дає підстави класифікувати комерційні КА ДЗЗ за просторовою розрізненністю на поверхні Землі з використанням розміру проєкції елементарного каналу зображення, а саме:

- *КА ДЗЗ надвисокого розрізнення* – розмір проєкції елементарного каналу зображення менше 1 м;
- *КА ДЗЗ високого розрізнення* – 1..3 м;
- *КА ДЗЗ середнього розрізнення* – 3..30 м;
- *КА ДЗЗ низького розрізнення* – 30..300 м;
- *КА ДЗЗ дуже низького розрізнення* – 0,3..3 км;
- *КА ДЗЗ наднизького розрізнення* – більше 3 км.

7.2.11. Класифікація космічних систем ДЗЗ за кількістю зон електромагнітного спектра

За кількістю зон електромагнітного спектра розрізняють (рис. 7.3):



а) *б)* *в)*

Рис. 7.3. *Класифікація космічних систем ДЗЗ за кількістю зон електромагнітного спектра [94]*
а – панхроматичні, б) багато- і мультиспектральні, в) гіперспектральні

– *одноканальні або панхроматичні* (моноспектральні);

– *багатоспектральні* (зображення однієї сцени отримуються одночасно в двох чи більше різних діапазонах електромагнітного спектра);

– *гіперспектральні* (багатозональне зображення отримується у великій кількості спектральних зон, до 100–1200 спектральних каналів) системи.

7.2.12. Класифікація космічних систем ДЗЗ за геометрією побудови знімка

У загальному випадку залежно від геометрії побудови знімка можна виділити три види зйомки: *кадрову*, *щілинну*, *сканувальну*.

Під час кадрової зйомки усі точки кадру фіксуються в один момент часу (при спрацюванні затвора). Такий знімок має єдиний центр проєктування та строгу геометрію побудови зображення.

Під час щілинного фотознімання зображення точок місцевості проєктуються об'єктивом фотокамери на фотоплівку через вузьку щілину, що забезпечує друк одного рядка кадру. Розгорнення зображення здійснюється за рахунок руху або плівки щодо щілини з одночасним переміщенням фотокамери відносно об'єкта зйомки, або щілини вздовж плівки.

У сканувальних камерах побудова зображення, як за рядком, так і за кадром, відбувається попіксельно, тобто кожна точка фіксується в окремий момент часу та має свій центр проєктування.

7.2.13. Класифікація систем ДЗЗ за спектральним діапазоном роботи

Для цілей ДЗЗ може використовуватись ЕМВ у діапазоні електромагнітного спектра 0,4 мкм – 30 м. Проте, як відомо, зйомка проводиться не в усьому зазначеному діапазоні, а в окремих зонах спектра, де є "вікна прозорості" атмосфери. Зони спектра поділяються на:

– *оптичний діапазон,* на який припадає основна частина сонячної енергії, що проходить крізь атмосферу Землі. Цей діапазон ЕМВ поділяється на піддіапазони:

• видимий (0,4–0,76 мкм), який розрізняється оком людини;

• ближній інфрачервоний (0,76–3,0 мкм), у якому формуються детальні зображення земної поверхні, використовувані для цілей картографування в різних масштабах.

В оптичному діапазоні працюють фотографічні, телевізійні, деякі інфрачервоні (ІЧ) і лазерні системи ДЗЗ;

– *середній і дальній ІЧ діапазони* спектра подано двома "вікнами прозорості": 3–5 і 8–14 мкм. На ці довжини хвиль припадає максимум власного теплового випромінювання Землі. Оскільки різні об'єкти, що знаходяться на земній поверхні, мають різні випромінювальні властивості, в цих діапазонах виходять знімки, що відображають теплову карту земної поверхні. Отримані знімки зберігають форму

природних об’єктів, проте їх тоновий і колірний контраст відрізняється від того, як це звикло сприймати око людини. Сфера застосування знімків: дослідження теплових властивостей об’єктів земної поверхні, побудова теплових полів їх випромінювання, моніторинг мереж теплопостачання в місті тощо. У цьому спектральному діапазоні дистанційне зондування виконується ІЧ і лазерними системами;

– *радіодіапазон* використовує ультракороткі електромагнітні хвилі (УКХ), що мають довжину хвилі 1 мм – 30 см. Приймач випромінювання може фіксувати як власне мікрохвильове випромінювання об’єктів, так і відбите (в цьому разі здійснюється опромінювання земної поверхні з борту носія). Зйомка виконується радіотехнічними станціями або станціями радіолокації бокового огляду, але найчастіше станціями радіолокації бокового огляду з антеною з синтезованою апертурою. Отримані зображення використовуються для моніторингу крижаних покривів, дослідження водних поверхонь і розв’язання інших завдань. Особливо перспективне використання цих матеріалів для отримання інформації про рельєф земної поверхні.

Спектральне розрізнення відповідає кількості й розміру спектральних зон зйомки і залежить від параметрів апаратури зйомки. Спектральна зона може бути широкою, як одна зона чорно-білого панхроматичного знімка (0,4–0,7 мкм), або досить вузькою, як наприклад, червона зона знімка апаратури "Landsat-TM" (0,63–0,69 мкм). Чим ширша зона електромагнітного спектра, тим нижче спектральне розрізнення. Чітке виділення спектральних зон підвищує ймовірність ідентифікації об’єктів, що цікавлять замовника [9].

Залежно від використовуваного діапазону ЕМВ розрізняють такі види зйомок:

– ультрафіолетову (ultraviolet);
– у видимому (optical) діапазоні;
– у ближньому інфрачервоному (ІЧ) (near infrared) діапазоні;
– у середньому ІЧ (middle infrared) діапазоні;
– у тепловому ІЧ (thermal infrared) діапазоні;
– у мікрохвильовому (microwave, passive microwave) діапазоні.

При одночасному використанні кількох діапазонів ЕМВ ведуть мову про *багатозональну* (multi-channel, multi-spectral, multi-band) або мультиспектральну зйомки, а при великій кількості використовуваних діапазонів (20–1000) – про *гіперспектральну* (hyperspectral) зйомку.

7.2.14. Класифікація систем ДЗЗ за радіометричним розрізненням

За радіометричним розрізненням (кількістю можливих рівнів і динамічним діапазоном квантування спектральної яскравості) космічні системи зйомки можна класифікувати як:

- *вузькодіапазонні*,
- *широкодіапазонні*;

• з *високим радіометричним розрізненням*;
• *з низьким радіометричним розрізненням.*

Радіометричне розрізнення оптико-електронних систем супутникової зйомки ІЧ спектра може досягати частин градусів температури в діапазоні сотні градусів яскравісної температури, а кількість розрядів кодування спектральної яскравості 6–12 біт (наприклад, радіометр "ATSR–2" космічного апарата "ERS–2" Європейського космічного агентства – 12 біт) [9].

7.2.15. Класифікація космічних систем ДЗЗ за часовими параметрами

Класифікація космічних систем ДЗЗ за часовими параметрами отримання й доведення до споживача супутникових знімків (періодичність огляду району спостереження, оперативність виконання заявки) залежить не тільки від просторово-часових параметрів орбіти польоту КА ДЗЗ та апаратури зйомки, а й від параметрів та координат елементів інфраструктури наземного інформаційного комплексу, продуктивності засобів обробки та передачі інформації [112; 116].

Засоби ДЗЗ, що базуються на геостаціонарних космічних апаратах, здатні безперервно здійснювати зйомку й передавати дані тільки по радіоканалу "КА → наземна станція прийому".

Для полярно-орбітальних космічних систем зйомки особливо важливим є період обертання КА ДЗЗ й період повторення траси. Вони та оглядовість апаратури зйомки визначають період повторної зйомки одного й того ж району. За наявності можливості керованого відхилення оптичної осі апаратури зйомки від надиру період повторної зйомки буде менший від періоду повторення траси. Період повторної зйомки сцени сучасними полярно-орбітальними космічними системами ДЗЗ становить 3–26 діб.

7.2.16. Класифікація космічних систем ДЗЗ за способом доставки

За способом доставки даних з борту КА системи ДЗЗ можна поділити на системи, в яких матеріали зйомки доставляються на Землю в спеціальних капсулах або на апараті, що приземляється (низька оперативність та малий термін активного існування системи), та системи з передачею даних по радіоканалу "КА → наземна станція прийому даних".

Характеристики аеро- та супутникових знімальних систем, що використовують для одержання даних ДЗЗ, подано в табл. 7.1 [6].

Технічні характеристики деяких сучасних космічних систем ДЗЗ та встановленої на них знімальної апаратури наведено в табл. 7.2 [5].

Таблиця 7.1

Класифікація аерокосмічних знімальних систем

За побудовою зображення та записом	**Тип системи**	**Тип сканування**	**Діапазони електромагнітного спектра, мкм**	**Приймач**	**Тип** проєкції
За одночасною побудовою та одночасним записом	фотографічна *кадрова* *щілинна* *панорамна*	кадрове щілинне панорамне	видимий, близький, ІЧ 0,4–1,3 мкм	фотоплівка	центральна проєкція центральна вздовж щілини панорамна
За одночасною побудовою та неодночасним записом	телевізійна	кадрове	0,4–1,3 мкм	ЕПТ	центральна
	оптико-електронна *матрична* *лінійкова* *багатоспектральний сканер* *гіперспектральний сканер*	 кадрове лінійне лінійне лінійне	оптичний до 14 мкм	 ПЗЗ-матриця ПЗЗ-лінійка ПЗЗ-лінійка ПЗЗ-лінійка	 центральна центральна вздовж рядка
	оптико-механічний сканер	панорамне	оптичний до 14 мкм	детектори	лінійна, конічна розгортка
	багатоспектральний сканер	панорамне	оптичний до 14 мкм	детектори	панорамна розгортка
	інфрачервона матрична лінійкова	кадрове лінійне	середній та дальній ІЧ 3,4-4,2; 8–12 мкм	болометрична матриця детектори	центральна центральна вздовж рядка
Системи з поелементною побудовою зображення і таким самим записом (сканувальні)	інфрачервона *тепловізор* *сканувальний радіометр*	панорамне	середній та дальній ІЧ 3,4–4,2; 8–12 мкм	детектори	панорамна
	лазерна	панорамне	*видимий, близький, ІЧ,*	детектори	панорамна
	мікрохвильовий радіометр	лінійне	*міліметрові радіохвилі*		лінійна, конічна розгортка тангенціальна розгортка
	радіолокаційна *радіолокаційні системи бічного огляду* *радіолокаційні системи з синтезованою апертурою*	панорамне	*сантиметрові радіохв.* *дециметрові радіохвилі*	антена-приймач антена-приймач	

Таблиця 7.2

Технічні характеристики сучасних космічних систем ДЗЗ

Космічна система (країна)	Апаратура ДЗЗ	Висота орбіти, км	Просторова розрізненність, м										Ширина смуги огляду, км	Періодичність огляду, діб
			V	N	I	T	M	X	C	S	L	P		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Keyhole (США)	KH-11	306	0,15											0, 16
	KH-11A	198	0,1	0,25										
Landsat-5 (США)	TM	705	30	30		120							183	16
	MSS		80	80									183	
Landsat-7 (США)	ETM+	705	15	30	30	60							183	16
Landsat-8 (США)	OLI, TIRS	705	15	30	30	60–100							170x185	16
Ikonos-2 (США)	SCT	681	1										11	1,5–2,9
	MS		4	4									11	
QuickBird-2 (США)	BHRC-60	450	0,61	0,72									16,5	4–5
	MS		2,44	2,88										
OrbView-3 (США)	ORHIS	430	1										8	3
	MSI		4	4									8	
EO-1 (США)	Hyperion	697	30	30	30								7,7	16
	ALI		10	30	30								37	
WordView-1 (США)	Multispectral Camera 60	496	3	3	3								40–50	4, 75
WordView-2 (США)	WV 110, PAN	770	0,46										16,4	1, 3
	MS		1,84											
GeoEye-1	ITT, PAN	684	0,41										15,2	1, 3
	MS		1,65											
JERS-1 (Японія)	OPS	568	18	18	24								75	44
	SAR										18		75	
ALOS (Японія)	PRISM	700	2,5										35	45
	ANVIR-2		10	10									70	
	PALSAR										10 20 100		70 250 360	

Продовження таблиці 7.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Radarsat-1 (Канада)	SAR-1	798	0,15						80–100				80–510	24
Radarsat-2 (Канада)	SAR-3	798							3–100				20–500	24
UK-DMC (Велика Британія)	DMC-Imager	785	32	32									300*	
TopSat (Велика Британія)	RALCam	600	2,5										15	48
RapidEye (Німеччина)	JSS-56	600	6,5	6,5									78	1
TerraSAR-X, NanDEM-X	SAR-X	514						1–3					30	11
SPOT-4 (Франція)	HRVIR	832	10	20									60 (117)*	
SPOT-5 (Франція)	HRG	830	2,5	5									60 (117)*	26
	HRS		10	10	20								120	
SPOT-6 (Франція)	HRG	695	1,5										60	26
	HRS		8										120	
Pliades -1A, 1B (Франція)	PAN	695	0,7	0,7									20	1
	MS		2,8	2,8										
FSW-1A (Китай)	CCB	250	15	50										
TH-1, TH-2 (Китай)	PAN	500	2										60	9
	MS		10	10										
	STEREO		5											
IRS-1D (Індія)	PAN	817	5,8										63–70	25
	LISS-III		23,5	23,5	70,5								127–141	
	WiFS		188	188									810	
IRS-P5 (Індія)	APC	617	2,5										60*	5
IRS-P6 (Індія)	LISS-III	820	23,5	23,5	70,5								127–141	11
	LISS-IV		5,8	5,8									23,5	
	AWiFS		56	56									740	
CartoSat-2 (Індія)	IAPS	630	1										10	4

Продовження таблиці 7.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	13	14
Kompsat-2 (Південна	PAN	685	1,0										15	3
Корея)	MS		4,0											
Ofeg-5 (Ізраїль)	El-Op Camera	370	0,8											
Ofeg-7 (Ізраїль)		500	0,1	0,25										
Eros-A (Ізраїль)	WISP	480	1,8										14	15
Eros-B (Ізраїль)	CCD/TDI	600	0,7	0, 9									13	15
EgyptSat-1 (Єгипет)	БЗЗ	668	7,8	7,8									46,6	4
	СІЧЗ				39,5								55,3	
RapidEye (Німеччина)	MS	630	6,5	6,5									77	1
Cosmo-SkyMed	SAR-2000	619							1–30				30	4
Комета (Росія)	КВР-1000	211	2										40	
	ТК-350		10										158	
Ресурс-Ф1М (Росія)	КФА-1000	225	5										144*	
	КАТЭ-200		30										188*	
Ресурс-О1 (Росія)	МСУ-Э	650	45	45									45	
	МСУ-СК		170	185		550							600	
Алмаз-Т (Росія)	РСА-3	307						12					170	
Монитор-Э (Росія)	ПСА	540	8	8									90	
	РДСА		20	20									160	
Ресурс-ДК (Росія)	Геотон-Л1	480	1–3										28,3–42	
Канопус-В (Росія)	ПС	510	2,1	2,1									20–23	5
	МС		10,5	10,5										
Метеор-3М (Росія,	МСУ-Э	1018	32	32									76	3
Україна)	МСУ-СМ		132	544									2240	
	МТВ-3А						12–75 км							
	МИВ-3А						25–110 км							
Січ-2 (Україна)	БЗЗ	668	7,8	7,8									46,6	4
	СІЧЗ				39,5								55,3	
БКА-2 (Білорусь)	ПСС	495	2,1										20,4	
	МСР		10,5	10,5									18,9	

* Два сенсори

Питання для самоконтролю

1. *Що розуміють під класифікацією в ДЗЗ?*
2. *Дайте класифікацію систем ДЗЗ за типом носія.*
3. *Дайте класифікацію систем ДЗЗ за побудовою зображення.*
4. *Дайте класифікацію систем ДЗЗ за використовуваними орбітами.*
5. *Дайте класифікацію систем ДЗЗ за призначенням.*
6. *Дайте класифікацію систем ДЗЗ за просторовою розрізненністю.*
7. *Дайте класифікацію систем ДЗЗ за кількістю зон електромагнітного спектра.*
8. *Дайте класифікацію систем ДЗЗ за часовими параметрами.*

VIII. АЕРОФОТОЗЙОМКА

Якісно та швидко виконати оцінку кубинської кризи (жовтень 1962 р.) дозволила лише багаторічна наполеглива робота фахівців найвищої кваліфікації в сфері аналізу матеріалів аерофотозйомки. Ці спеціалісти отримали такий досвід у дешифруванні фотознімків ракетних баз, що там, де новачок нічого не розібрав би або міг би видати неправильну оцінку, вони, переглянувши зняті на плівку ракети на Кубі, надали достовірний розвідувальний висновок.
Ален Даллес "Мистецтво розвідки"

Аерофотознімання є одним із методів вивчення земної поверхні, який широко застосовується при створенні топографічних карт різних масштабів, а також під час геологічних та геоморфологічних досліджень, при обліку рослинних та водних ресурсів, у транспортному будівництві тощо. Це забезпечується головним чином у результаті якісного і кількісного дешифрування планових аерофотознімків.

Аерофотозйомка є досить достовірний і ефективний метод отримання оперативної геопросторової інформації різних об'єктів земної поверхні. Підкріплена також високими графічними, геометричними, координатними й інформативними складовими. Аерофотозйомка використовується для лазерного сканування, цифрової зйомки, супутникового позиціонування і створення безпілотних літальних апаратів.

Застосування аерофотоматеріалів в науках про Землю і різного типу інженерних вишукуваннях привело до покращення якості складання топографічних та геологічних карт у бік суттєвого збільшення їх детальності, точності і достовірності.

Досвід використання геодезичних БПЛА в різних галузях невпинно зростає. Пристрої БПЛА показують значні переваги та мінімізують недоліки в порівнянні з іншими методами. Сучасна техніка робить акцент на побудові топопланів, рельєфу, зокрема у віддалених та важкодоступних місцях, створення вимірюваних 3D-моделей з реальною текстурою.

8.1. Загальні відомості про аерокосмічну зйомку

Аерозйомка – процес отримання фотографічного або цифрового зображення земної поверхні з повітряних літальних апаратів з метою одержання, дослідження і подання об'єктивних просторових даних з ділянок виконаної зйомки *(рис. 8.1).*

Це комплекс робіт, що включає різні процеси – від фотографування земної поверхні до одержання аерофотознімків, фотосхем або фотопланів знятої місцевості.

Якщо аерофотозйомку виконують для отримання топографічних матеріалів, то її називають *топографічною аерофотозйомкою*. В інших випадках – *спеціальною аерофотозйомкою*.

а) *б)* *в)*

Рис. 8.1. *Способи отримання даних: а) за допомогою аерофотозйомки; б) за допомогою гелікоптера; в) за допомогою БПЛА*

Після виконання аерозйомки здійснюється її обробка для переходу до ортогональної проєкції. Якщо в результаті проведеної роботи створюється план місцевості без виділення рельєфу горизонталями, то весь процес аерофотозйомки називається *контурною аерофотозйомкою*; якщо створюється план з рельєфом, вираженим горизонталями за допомогою стереоскопічної моделі місцевості, то маємо справу з *висотно-стереоскопічною аерофотозйомкою*; якщо нанесення рельєфу здійснюється звичайним шляхом наземної зйомки за готовим аерофотознімальним матеріалом контурної аерофотозйомки, то аерофотозйомка називається *контурно-комбінованою*.

Аерозйомки дозволять виконувати різноманітні завдання (інвентаризація територіальних систем, оцінка їх стану і можливостей використання, дослідження динаміки (моніторинг), прогнозування тощо). Аерознімки є доволі корисним матеріалом при районуванні територій.

Аерофотозйомка здійснюється на науково-методичній базі аерогеодезичними підприємствами (АГП) та організаціями, є інструментом створення й оновлення топографічних карт, дослідження й інвентаризації земельного і лісового фонду тощо.

Фотоплани, що створюються на основі трансформованих аерофотознімків з високою точністю, використовувалися і використовуються для топогеодезичних, вишукувальних, проєктних робіт, вимагають детального дослідження місцевості і точного визначення відстаней і площ.

Сьогодні аерофотознімальне виробництво повністю перейшло на використання цифрових аерофотосистем, тим самим витіснивши з практики використання аналогові (плівкові) аерофотоапарати і перехідні, так звані гібридні, фотосистеми. При цьому цифрова аерофотозйомка характеризується істотно більшою продуктивністю, більш високою метричною точністю, високим просторовим і радіометричним розрізненням, дозволяючи отримати високоякісні, як панхроматичні, так і багатозональні (*R, G, B, IR*), знімки місцевості для ефективного виконання широкого кола завдань, таких як:

– створення та оновлення цифрових топографічних і спеціальних карт;
– створення 3D моделей рельєфу і місцевості;
– створення картографічної основи кадастру об’єктів нерухомості;
– екологія і природокористування (сільське і лісове господарство);

– моніторинг різного типу об’єктів;

– реагування на надзвичайні ситуації;

– створення візуальних інформаційних систем.

Перехід на цифрові методи аерофотографування обумовлений цілою низкою істотних переваг цифрової аерофотозйомки перед аналоговою (рис. 8.2) і, що особливо важливо, переходом повністю на цифрові методи процесів фотограмметричної обробки матеріалів аерофотозйомки.

Рис. 8.2. *Фрагменти знімків, отриманих цифровим (праворуч) і аналоговим аерофотоапаратом (ліворуч) із близькими оптичними характеристиками*

Сьогодні усі процеси автоматизованого дешифрування також орієнтуються на цифрові технології обробки матеріалів аерозйомки. Це зумовлено низкою переваг:

– відсутність процесів фотохімічної обробки, трудомістких операцій створення твердих копій (позитивів на плівці і відбитків на папері) і необхідності спеціалізованих фотолабораторій;

– відсутність процесу перетворення фотознімків на цифрову форму, тобто сканування аерофотознімків;

– відсутність деформації фотоприймача (матриці) і пов’язаних з цим геометричних викривлень аерофотознімків;

– більш високу фотометричну якість, пов’язану з великим динамічним діапазоном цифрових знімків, що проявляється в проробці деталей у глибоких "тінях і світлах";

– відсутність необхідності внутрішнього орієнтування знімків за координатними мітками при фотограмметричній обробці;

– відсутність слідів механічних пошкоджень і пилу на зображенні.

Очевидні переваги цифрової аерофотозйомки привели не тільки до розробки провідних світових виробників геодезичного приладобудування в галузі створення великоформатних фотоприймачів на базі матричних і лінійних приладів зарядового зв’язку (ПЗЗ), але й інших науково-технічних рішень у напрямку практично повної і комплексної автоматизації аерофотознімального процесу.

Сучасні камери і фотограмметричні сканери дозволяють одержувати зображення з розрізненням до 5 см під час зйомки з висоти 1000 м [41]. А розрізненність у 15–20 см є абсолютно звичною для сучасних аерознімальних систем, таких як Vexcel UltrCam, Leica ADS, DiMAC, 3-DAS-1 та низки інших (рис. 8.3).

Цифрова камера Vexcel UltraCamD Camera Ref. 710

Скануюча аерофотокамера Leica ADS 100

Широкоформатна кадрова аерофото-камера Leica DMCIII

Цифрова камера DiMAC

Цифрова камера 3-DAS-1

Камера Vexcel UltraCam Eagle Prime

Рис. 8.3. *Сучасні цифрові камери для аерозйомки*

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР), що отримуються при фотограмметричній обробці даних аерозйомки, також є більш точними. Застосування лідарної зйомки дозволяє отримувати ще більш точні ЦМР.

При аерозйомці застосовуються навіть малі літаки. Використання серво-платформ дає можливість компенсувати викривлення, що виникають при коливаннях камери.

Власне, геометрична точність кінцевих продуктів сучасної аерозйомки мало залежить від умов зйомки, а переважно визначається камеральною обробкою. При цьому визначаються елементи зовнішнього орієнтування знімка, а за допомогою аналітичної фототріангуляції, за наявності 20–40 опорних точок на блок знімків, можна досягти точності визначення координат в 10 см і навіть краще (все залежить від висоти зйомки і, відповідно, масштабу знімків). Тому навіть якщо аерозйомка буде виконана з великої висоти і буде позначатися вплив атмосферних ефектів, "шумів" камери та інших несприятливих чинників, аерознімки апріорі будуть більш точними й інформативними на відміну від супутникових знімків.

Робота з аерознімками в стереорежимі вимагає як наявності цифрових фотограмметричних станцій, так і кваліфікованих фахівців, а вартість готових фотопланів у рази перевищує вартість супутникових знімків, оскільки ціна фотоплану складається з вартості зйомки і вартості фотограмметричних робіт. Ортотрансформацію ж космічного знімка цілком можна провести самостійно –

потрібні лише надійна цифрова модель рельєфу (ЦМР) і програмне забезпечення (ERDAS, PCI, ENVI, Digitals, PHOTOMOD тощо).

До недоліків аерозйомки можна також віднести:

– час проведення спостережень і вимірів складає декілька годин, тоді як супутники спроможні забезпечувати спостереження протягом декількох років. Деякі програми моніторингу, наприклад, розраховуються на 7 років;

– оскільки висота огляду з літального апарату набагато менша від висоти огляду з супутника, то й зона охоплення при спостереженнях з літального апарату буде набагато меншою. Проте треба зазначити, що з малої висоти можна здійснювати більш детальні дослідження;

– оскільки літальний апарат переміщується в атмосфері Землі, а атмосфера перебуває в постійному русі, то вона впливає на положення літального апарата відносно поверхні Землі, що вносить похибки у виміри.

Варто зазначити, що аналогічна проблема існує і при переміщенні супутника, але в значно меншому ступені.

Іноді можна почути нарікання щодо якості зображення на супутникових знімках, яку не вдається покращити ані атмосферною корекцією, ані одним з відомих способів фільтрації. Проте й аерозйомка може бути неякісною (дистанційне зондування з висоти 3000 м і більше, порушення технології як в ході зйомки, так і в процесі виконання фотограмметричних робіт, використання застарілого обладнання, недотримання технології при фототриангуляції, похибки визначення координат опорних точок тощо – все це погіршує якість кінцевого продукту – фотоплану, що використовується при топографічних і земельно-кадастрових роботах).

8.2. Класифікація аерофотозйомки

Аерофотозйомка (англ. *aerial photography, aerophotography; нім. Luftbildaufnahme; фр. photographie aerienne*) **– *дистанційний метод дослідження земної поверхні шляхом фотографування в різних зонах спектра електромагнітного випромінювання з літака або інших повітряних літальних апаратів.***

Розрізняють *фотографічну* (*аерофотозйомку*), *телевізійну*, *теплову інфрачервону*, *радіолокаційну* і *багатозональну* аерозйомки. Крім цього, традиційні аерометоди включають низку геофізичних зйомок – *аеромагнітну*, *аерорадіометричну*, *аероспектрометричну,* за результатами яких отримують цифрову інформацію про досліджувані об’єкти.

Основними характеристиками аерофотозйомки є *висота* і *масштаб, придатний сезон* і *час зйомки*, а також *сприятливі метеоумови*. Аерофотозйомки виконують із малих і великих висот. При цьому нижня межа регламентується вимогами безпеки польотів, а верхня – межею польоту авіаносіїв. Від висоти польоту залежить масштаб аерозйомки. Чим менша висота, тим вище розрізнення зйомки і, відповідно, більший масштаб знімків. При великій висоті аерофотозйомки її розрізненність зменшується, а отже, зменшується масштаб знімків.

Під час зйомки з літака декількома апаратами з різною фокусною відстанню забезпечується одержання знімків різного масштабу при однаковій висоті польоту.

Аерофотозйомка виконується за допомогою спеціальних аналогових або цифрових камер. Якщо аерозйомку здійснюють аналоговими камерами (фотоапаратами), то її називають *аерофотозйомкою*, якщо за допомогою спеціальних радіоелектронних пристроїв, то *електронною зйомкою*. При аерофотозйомці одержують фотографічне зображення місцевості у вигляді аеронегативів і аерознімків, а при електронній аерозйомці – у вигляді електричних сигналів, записаних на магнітну стрічку, або у вигляді сигналів, переданих на землю для телевізійного відтворення зображення.

За знімками за допомогою дешифрування і вимірювань вивчають видимі й приховані об'єкти.

Аерофотозйомка виконується за допомогою спеціального аерофотоапарата. Масштаб знімків (*m*) при аерофотозніманні визначається висотою фотографування (*H*) і фокусною відстанню аерофотоапарата (*f*):

$$m = \frac{f}{H}.$$

Залежно від масштабу аерозйомку поділяють на типи:

– *крупномасштабна* – масштаб більший від 1:10 000;

– *середньомасштабна* – масштаб від 1:10 000 до 1:30 000;

– *дрібномасштабна* – масштаб дрібніший 1:30 000.

Найбільш поширеною аерозйомкою малої авіації є крупномасштабна і середньомасштабна.

У разі прив'язки планових аерознімків до глобальної або місцевої системи координат на виході аерофотозйомку називають *топографічною.*

Аеровишукування – це комплекс спеціальних повітряних, наземних, польових і камеральних робіт для отримання вихідної топографо-геодезичної, інженерно-геологічної, гідрологічної, гідрометричної, економічної та інших видів інформації, необхідної для розробки проєктів інженерних споруд.

Аеровишукування виконують у три етапи: *підготовчий*, *польовий* і *камеральний*. Їх виконують за сучасними технологіями із застосуванням аерознімального, навігаційного (систем навігації *GPS)* та стереофотограмметричного устаткування сучасними засобами автоматизації та комп'ютерної техніки.

У підготовчий період здійснюється збір наявної на район вишукувань топографічної інформації і матеріалів аерозйомок минулих років, на підставі яких обґрунтовують смугу варіювання конкурентоздатних варіантів траси і складають проєкт проведення аерознімальних, польових і камеральних аерофотогеодезичних робіт.

У польовий період здійснюють: наземні геодезичні роботи зі створення планово-висотного обґрунтування аерозйомок; закріплення і маркування точок опорної мережі; різні види аерознімальних робіт, прив'язку і дешифрування аерофотознімків. Важливим видом аерогеодезичних вишукувань є дешифрування – виявлення, розпізнавання і розкриття змісту (розрізнення) об'єктів і елементів місцевості за їх зображеннями на знімках, їх якісними та кількісними характеристиками, своєрідними властивостями та особливостями.

У камеральний період виконують повну обробку результатів геодезичних вишукувань, фотограмметричне згущення геодезичного знімального обґрунтування методами аналітичної фототриангуляції, стереофотограмметричні роботи з одержання інформації про рельєф і виготовлення топографічних планів та цифрових моделей місцевості (ЦММ) у єдиній системі координат.

8.3. Складові етапи аерофотозйомки

Аерофотозйомка передбачає такі етапи:
– *проєктний*;
– *льотно-знімальний (аерофотографічний);*
– *фотолабораторний;*
– *фотограмметричний*.

Проєктний етап передбачає складання технічного проєкту льотно-знімальних робіт з розрахунком завдання на аерофотозйомку.

Перед початком льотно-знімальних робіт перевіряють і готують до роботи устаткування матеріали та польотні карти, на яких прокладають маршрути польоту, проводять тренування екіпажів і складають графік польотів, аерофотозйомник-оператор визначає кут зносу і шляхову швидкість літака, тобто швидкість руху літака відносно Землі. З урахуванням величини кута зносу літак розгортають проти вітру на кут попередження. Значення шляхової швидкості літака або іншого носія потрібне для обчислення інтервалу часу між експозиціями. Кут зносу і шляхову швидкість літака визначають за допомогою оптичних візирів у прямому і зворотному напрямках за маршрутом. Після цього розпочинають прокладання маршрутів відповідно до проєкту. Маршрут літака прокладають за приладами і контролюють за земними орієнтирами. За відсутності орієнтирів маршрути і заходи на них виробляють інструментальним методом, особливість якого полягає в прокладці маршрутів тільки на підставі показань навігаційних і пілотажних приладів.

Льотно-знімальний період (аерофотографічний) складається з аеронавігаційних розрахунків, що виконуються відповідно до заданих вимог до аерофотозйомки і фотографування місцевості за цими розрахунками. Це політ над територією дослідження за розробленими технічними умовами.

Лінію, що є траєкторією польоту літака під час фотографування, називають *маршрутом*. Якщо ця лінія пряма, то маємо прямолінійний маршрут; також існують криволінійний та ламаний маршрути. Якщо фотографування велось у межах одного маршруту, то це маршрутна аерофотозйомка. Якщо фотографують певну територію з кількох паралельних маршрутів, то маємо багатомаршрутну аерофотозйомку.

Знімальні роботи полягають у фотографуванні місцевості спеціальними фотоапаратами, встановленими в певному положенні на літальному апараті. Зазвичай аерофотозйомка виконується прямолінійними паралельними маршрутами з частковим перекриттям сусідніх аерофотознімків одного маршруту (*повздовжнє перекриття*) або суміжних маршрутів (*поперечне перекриття*), що дозволяє визначати просторові координати точок місцевості (рис. 8.4), зберігаючи за можливістю попередню висоту польоту.

Необхідність повздовжнього і поперечного перекриття (рис. 8.5) зумовлена як необхідністю одержання об'ємної моделі місцевості, так і при наступній обробці фотознімків використовувати лише центральні частини, що піддані найменшим викривленням.

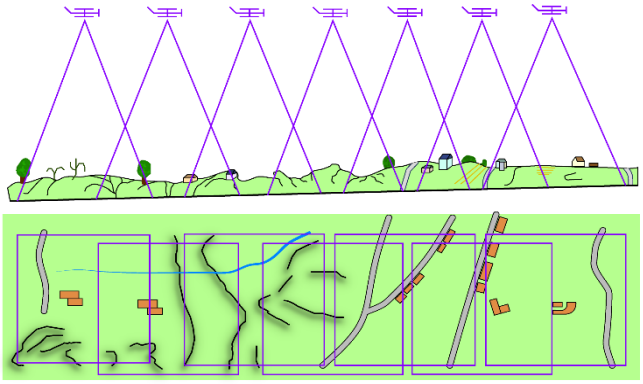


Рис. 8.4. *Розробка маршруту польоту*

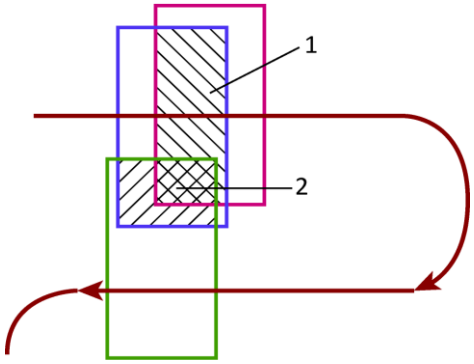


Рис. 8.5. *Повздовжнє (1) і поперечне (2) перекриття знімків при аерофотозніманні*

Повздовжнє перекриття трьох послідовних фотознімків є обов'язковим тому, що воно визначає величину перекриття між сусідніми стереопарами. В межах цього перекриття набирають точки зв'язування, які забезпечують передачу координат з однієї стереопари на другу. В поперечному перекритті намічають точки польової прив'язки аерофотознімків, точки зв'язування для передачі координат з одного маршруту на інший.

Повздовжнє перекриття P_x аерофотознімків має бути в середньому 60 % (мінімальне перекриття 56 %), що забезпечує наявність потрійного повздовжнього перекриття не менше 12 % (рис. 8.6, *а*). Поперечне перекриття P_y аерофотознімків суміжних маршрутів (рис. 8.6, *б*) має бути в середньому 30–40 % з допустимим мінімальним значенням 20 % і максимальним, яке не перевищує середнє на 10–20 %. Непаралельність базису фотографування стороні фотознімка (рис. 8.6, *в*), так званої "ялинки", не повинна перевищувати 5° для фокусних відстаней фотокамер $f = 100$ мм і менше, 10–12° для $f = 200–350$ мм і 14° – для $f = 500$ мм [34; 3].

Поперечне перекриття дозволяє об'єднувати знімки сусідніх маршрутів. Зазвичай поперечне перекриття становить 30 %.

Перекриття знімків дозволяє об'єднати розрізнені аерознімки в єдиний масив, що цілісно відбиває сфотографовану територію.

Час для виконання зйомки обирається таким чином, щоб знімки забезпечували максимум інформації про територію зйомки. Враховують наявність снігового покриву, зміну фенофаз розвитку рослинності, стан сільськогосподарських угідь, режим водних об'єктів, вологість ґрунтів тощо.

Зазвичай аерофотозйомку виконують у літні безхмарні дні, близько опівдня, проте в деяких випадках, наприклад для вивчення ґрунтів, лісів, перевага віддається пізньовесняним або ранньоосіннім зйомкам.

Зйомка плоскорівнинної місцевості при низькому положенні Сонця у ранні або вечірні години дозволяє отримувати найбільш виразні знімки, на яких

мікрорельєф підкреслюється прозорими тінями. Однак освітленість земної поверхні повинна бути достатньою для аерофотозйомок з короткими експонувальними витримками. Тому зйомку при висоті Сонця менше 20º зазвичай не виконують [3].

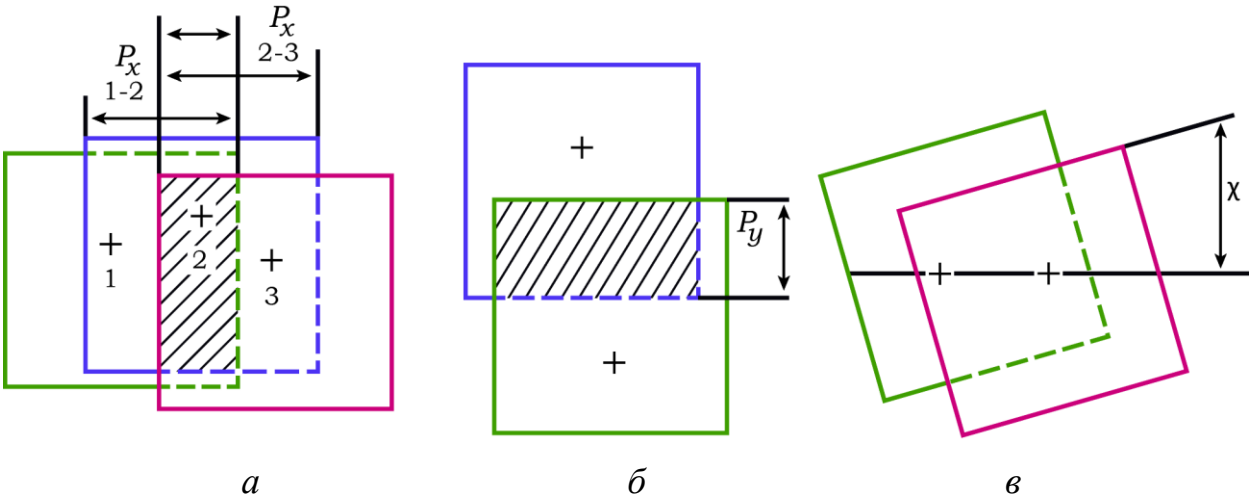


Рис. 8.6. *Схема повздовжнього (а) і поперечного (б) перекриттів аерофотознімків, а також непаралельність базису фотографування стороні аерофотознімка (в)*

При прокладанні маршрутів аерофотозйомки використовують спеціальне навігаційне обладнання, для визначення просторового положення аерофотознімків – радіовисотомір (для фіксації висоти фотографування), статоскоп (для реєстрації зміни висоти польоту), літаковий радіодальномір (для визначення планових координат).

Знімки шляхом трансформування приводять до горизонтальної проєкції до масштабу, потрібного для побудови плану. Щоб виконати трансформуваня, на знімках потрібно мати декілька точок, координати яких відомі. Ці точки називають *розпізнавальними знаками.* Їх розпізнавання (знаходження) на знімку і на місцевості, а також визначення координат здійснюють у результаті польових вимірів на місцевості [10].

Топографічну карту або план одержують стереофотограмметричним способом, при якому рельєф зображають у камеральних умовах за допомогою стереоприладів. Для цього потрібно на кожному знімку мати декілька точок з відомими висотами (висотними розпізнавальними знаками).

План місцевості складають або отриманням фотоплану і перенесення на нього горизонталей зі знімків, або одночасним малюванням ситуації і рельєфу на стереоприладах.

Після завершення льотно-знімальних робіт оцінюється якість отриманих матеріалів: визначається фотографічна якість аеронегативів (величина коефіцієнта контрастності, максимальна щільність, щільність вуалі), перевіряється прямолінійність маршрутів зйомки, контролюється повздовжнє і поперечне перекриття тощо [10].

Лабораторні роботи полягають у хіміко-фотографічній обробці експонованої аерофотоплівки, оцінці фотоякості аерофотозйомки і одержанні контактних відбитків.

Польові фотограмметричні роботи полягають у виконанні двох процесів: негативного і позитивного. Негативний процес передбачає прояв, фіксацію та промивку експонованої аероплівки на спеціальних ручних або автоматизованих приладах, які сконструйовані так, щоб забезпечити рівномірний і правильний у часі прояв плівки. Найбільш часто використовуються прилади для проявлення плівки з пристроєм перемотування плівки, що складаються з двох котушок, розташованих на одній загальній станині, обертаються. Плівку рівномірно перемотують з однієї котушки на іншу вручну або за допомогою електромотора, в цей час плівка знаходиться в розчині проявника. Після сушіння аерпоплівку передають у фотограмметричну групу, де негативи реєструють і нумерують. Потім аероплівка (аерофільм) надходить у фотолабораторію для виготовлення позитивних відбитків. Позитивний процес полягає в отриманні контактних аерофотознімків шляхом друкування на спеціальних верстатах фотозображення з негативів на світлочутливий фотопапір або позитивну фотоплівку. Контактні відбитки повинні бути достатньо контрастними і мати прийнятну розрізненність деталей за усією площею негатива. Для одержання таких аерознімків потрібно враховувати ступінь контрастності негативів при наборі фотопаперу, дотримуватись потрібної експозиції і технології проявлення. Нумерацію і реєстрацію аеронегативів виконують відразу ж після просушки аерофільмів. Кожний аеронегатив нумерують з емульсійного боку в лівому верхньому куті зворотного аркуша. Крім порядкових номерів аерофотознімків, підписують дату і номенклатуру району аерофотознімка. Всі аерофотознімки реєструють у журналі і відправляють до фотолабораторії для здійснення контактного друку. Попередньо аерофотознімки розкладають за маршрутами. Монтаж починають з верхнього маршруту справа наліво або навпаки, щоб було видно номери аерофотознімків, які послідовно накладають один на один, монтують за контурами ситуації місцевості в місцях перекриттів і скріплюють кнопками. Кожний наступний маршрут пов’язують із попереднім за перекриттями. Одержаний робочий накидний монтаж дозволяє встановити межі знятої території, перевірити технічну фотографічну якість знімальних робіт. Даючи попередню оцінку якості аерофотознімків, встановлюють місця, які підлягають повторній аерофотозйомці, якщо перекриття між аерофотознімками менше від заданої величини або є фотографічні дефекти.

За змонтованими контактними відбитками (накидним монтажем) здійснюються виміри з метою остаточної оцінки якості аерофотозйомки.

Аерофотооптика за своїм призначенням поділяється на оптику для топографічної й оглядової фотозйомки.

Аерофотозйомку виконують на чорно-білій, кольоровій і спектрозональній фотоплівках. Частіше використовують чорно-білу фотоплівку, тому що вартість її виготовлення і фотохімічної обробки нижча, ніж у інших типів фотоплівок. Кольорову і спектрозональну фотоплівки використовують у тих випадках, коли основною метою є дешифрування об’єктів на земній поверхні.

За типом використаної фотоплівки розрізняють *чорно-білі* (монохромні), *кольорові* (панхроматичні) і *спектрозональні* аерофотознімки, виконані в умовних кольорах. Багатозональну аерофотозйомку здійснюють одночасно в декількох зонах спектра [10].

Фотозйомка повинна виконуватись за відсутності хмар, висота Сонця над горизонтом має бути не нижчою 20° при фотографуванні на чорно-білу фотоплівку і 25° – на кольорову або спектрозональну.

Аеронегативи, контактні відбитки з них на фотопапері, а також діапозитиви на скляних пластинках повинні мати різке і добре оброблене зображення по всій площині.

На сучасному етапі аерозйомка здійснюється на спеціальну високочутливу авіаплівку, яка в момент зйомки вирівнюється й автоматично перемотується. В одній касеті запас плівки становить 100–300 аерознімків. Найчастіше використовуються аерофотоплівки завширшки 7, 8, 19 і 32 см, на яких утворюються кадри розмірами 8х8, 18х18, 18х24, 30х30 см.

Висота фотографування визначається заданим масштабом знімків.

Аерозйомка земної поверхні здійснюється з літаків (Ан-2, Ан-30, Іл-14 (ФКМ), Ту-134 СХ, Ан-28 ФК) і гвинтокрилів, обмежено використовуються аеростати, мотодельтаплани і БПЛА (рис. 8.7) для зйомки невеликих площ.

Рис. 8.7. *Носії аерознімальної апаратури*

Аерозйомка здійснюється з використанням знімальних систем, які працюють у різних ділянках спектра ЕМХ.

Носієм аерофотознімального обладнання під час зйомки в середніх і менших масштабах служить літак Ан-30, верхня межа висоти польоту якого становить 8 км, середня швидкість – 440 км/год.

Для аерозйомки в середніх масштабах використовують літак Іл-14 ФК, висота польоту якого досягає 6 км і середня крейсерська швидкість становить 300 км/год.

Літак Ан-2 призначають для зйомки в крупних масштабах. Висота польоту його дорівнює 5 км, середня швидкість – 180 км/год. Для фотозйомки у тих же масштабах, але на невеликих ділянках земної поверхні використовується гвинто-крил Ка-26, висота польоту якого досягає 3 км і середня швидкість становить 140 км/год.

Відхилення висоти польоту над середньою площиною знімальної ділянки від її розрахованого значення не повинно перевищувати 3 % при зніманні рівнинних районів і 5 % – гірських.

Аерофотозйомку можна класифікувати за декількома критеріями:

– залежно від величини кута нахилу α між головною оптичною віссю знімальної камери і прямовисної прямої (рис. 8.8) аерофотозйомку поділяють на *планову* ($\alpha < 3^\circ$) і *перспективну* ($\alpha > 3^\circ$).

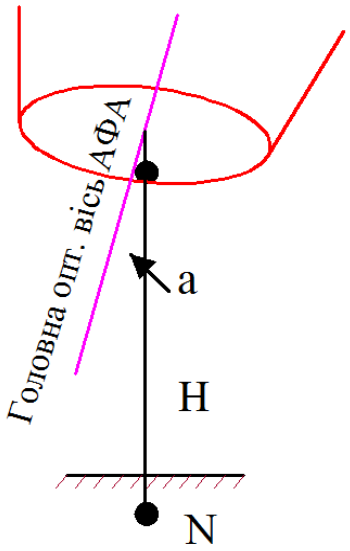


Рис. 8.8. *Відхилення головної оптичної осі АФА від прямовисної лінії*

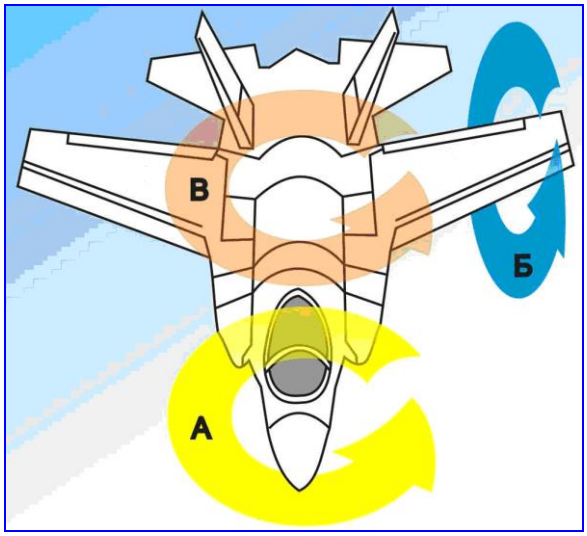


Рис. 8.9. *Відхилення літака при польоті за прямолінійному маршрутом: А – крен; Б – тангаж; В – рискання*

Під час планової зйомки оптична вісь аерофотоапарата приводиться у прямовисне положення, при якому знімок буде горизонтальним. Однак у процесі польоту за прямолінійним маршрутом аерознімальний літак періодично зазнає відхилень, які характеризуються кутами *тангажу*, *крену* і *рискання* (рис. 8.9).

Крім того, через коливання літака аерофотоапарат також нахиляється і розвертається. Тому до планових відносять знімки, при яких відхилення головної оптичної осі АФА від прямовисної лінії не перевищують 3°.

Аерофотозйомка за напрямом оптичної вісі під будь-яким кутом відхилення від вертикалі називається *перспективною*, або *нахиленою*. Порівняно з

плановим перспективний знімок захоплює більшу площу, а зображення отримується у більш звичному для людини ракурсі.

Аерофотозйомка з одночасним застосуванням обох видів фотографування називається *планово-перспективною*. До аерозйомки такого виду належить *панорамна* зйомка, яка виконується різними способами: обертанням об'єктива, розміщенням попереду об'єктива обертових призм або дзеркал тощо.

Залежно від поставленого завдання і розмірів ділянки фотографування місцевості розрізняють аерофотозйомки:

– *одинарну* – коли об'єкт фотографування розміщується на одному або двох знімках;

– *маршрутну* – коли виконується фотографування вузької смуги місцевості (річки, дороги, берегові лінії тощо);

– *багатомаршрутну* або *площинну* – коли ділянка зйомки за своїми розмірами не може бути відображена на знімках одного маршруту і для його фотографування потрібно декілька паралельних маршрутів, що зазвичай прокладаються із заходу на схід на певній відстані один від одного. В процесі багатомаршрутної зйомки на кожний наступний знімок потрапляє частина місцевості, яка зображена на попередньому знімку.

Аерофотознімки, отримані з повздовжнім перекриттям, утворюють стереоскопічні пари.

У деяких випадках при виконанні площинної аерофотозйомки прокладаються додаткові аерознімальні маршрути, що перетинають основні. Такі маршрути розміщуються, як правило, на початку і наприкінці основних маршрутів і називаються *каркасними*.

Залежно від мети і поставлених завдань аерофотозйомка виконується в межах топографічних планшетів або адміністративно-територіальних одиниць.

В аерофотоапаратах (АФА) реалізуються три основні схеми фотографування: кадрове, щілинне і панорамне. Використовувані при цьому аерофотоапарати називають, відповідно, кадровими, щілинними і панорамними.

При кадровому фотографуванні (рис. 8.10, *а*) ділянка земної поверхні *1* одночасно проєктується за допомогою аерофотооб'єктива *2* на площину *3*, з якою співпадає світлочутливий шар аерофотоматеріалу.

Фотозображення місцевості утворюється у вигляді окремих кадрів аерофотознімків або супутникових знімків, оптична вісь знімальної камери перпендикулярна до площини *3*. Оскільки при кадровому фотографуванні здійснюється одночасне проєктування ділянки земної поверхні на весь кадр зображення, аерознімок, що утворюється при цьому, є центральною проєкцією місцевості, тобто земна поверхня подається сумою окремих зображень, отриманих за законом центральної проєкції. Розміри кадра зображення в площині 3 обмежені прикладною рамкою.

При щілинному аерофотографуванні (рис. 8.10, *б*) смуга земної поверхні безперервно послідовно проєктується за допомогою аерофотооб'єктива 2, що поступово переміщується, на аерофотоматеріал *3*, що безперервно рухається в тому ж напрямку крізь щілину *4*. Швидкості переміщення об'єктива й аерофотоматеріалу узгоджені. При щілинному аерофотографуванні зображення земна

поверхня подається не у вигляді окремих кадрів, а суцільною стрічкою – неперервною послідовністю зображень вузьких смуг земної поверхні *7*; закону центральної проєкції відповідає лише зображення вузької смуги місцевості *5*, що отримується в площині щілини *4* у певний момент часу.

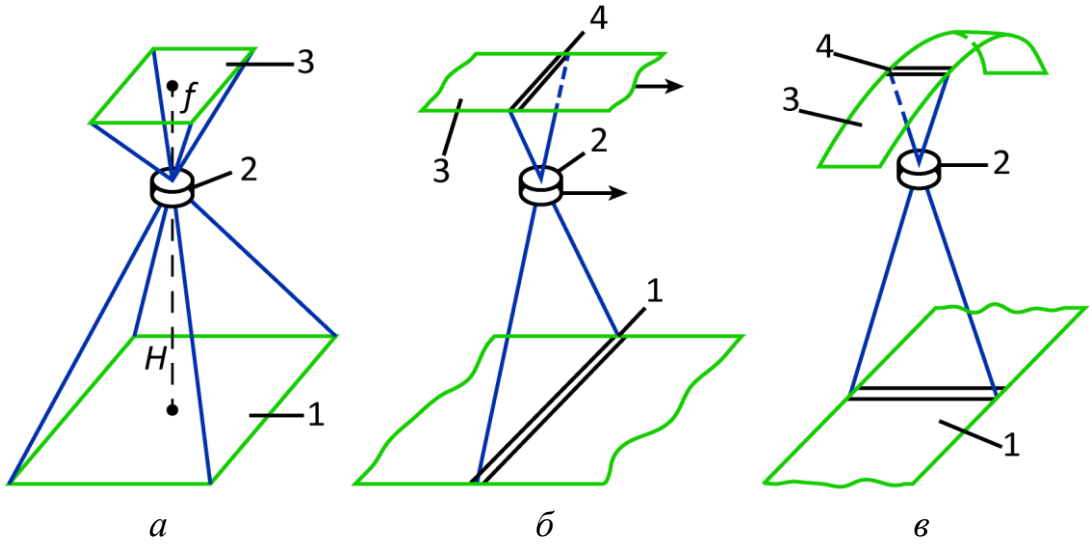


Рис. 8.10. *Три схеми фотографування: а) кадров; б) щілинне; в) панорамне;*

Під час щілинного знімання аероплівка у міру перемотування піддається суцільному експонуванню. Для одержання контрастного фотозображення потрібно дотримуватися умови рівності швидкості руху плівки і переміщення зображення у фокальній площині камери.

При панорамному аерофотографуванні (рис. 8.10, *в*) ділянка земної поверхні *1* проєктується за допомогою аерофотооб'єктива *2* на аерофотоматеріал *3*. При цьому забезпечується практично миттєве послідовне проєктування ділянки місцевості на аерофотоматеріал, що досягається, наприклад, обертанням аерофотооб'єктива або іншими способами. В результаті панорамного аерофотографування отримують окремі смуги-панорами, що зображають земну поверхню від горизонту до горизонту.

8.3.1. Планова аерофотозйомка

Під час планової зйомки оптична вісь знімальної системи спрямовується вертикально вниз, у прямовисне положення (під кутом 90º) до поверхні Землі, при якому знімок буде горизонтальним (рис. 8.11).

При цьому на знімках ми бачимо плоску картину (ортогональна проєкція), що нагадує зображення на географічних картах. При цьому виді аерофотозйомки можна визначити взаємне розташування об'єктів на площині без урахування їх висот. При фотографуванні об'єктів нерухомості можна бачити ті частини споруд, які спрямовані вгору (дахи).

Планова аерофотозйомка головним чином використовується для створення фотопланів, хоча сучасні технології фотограмметричної обробки аерознімків такого обмеження не висувають.

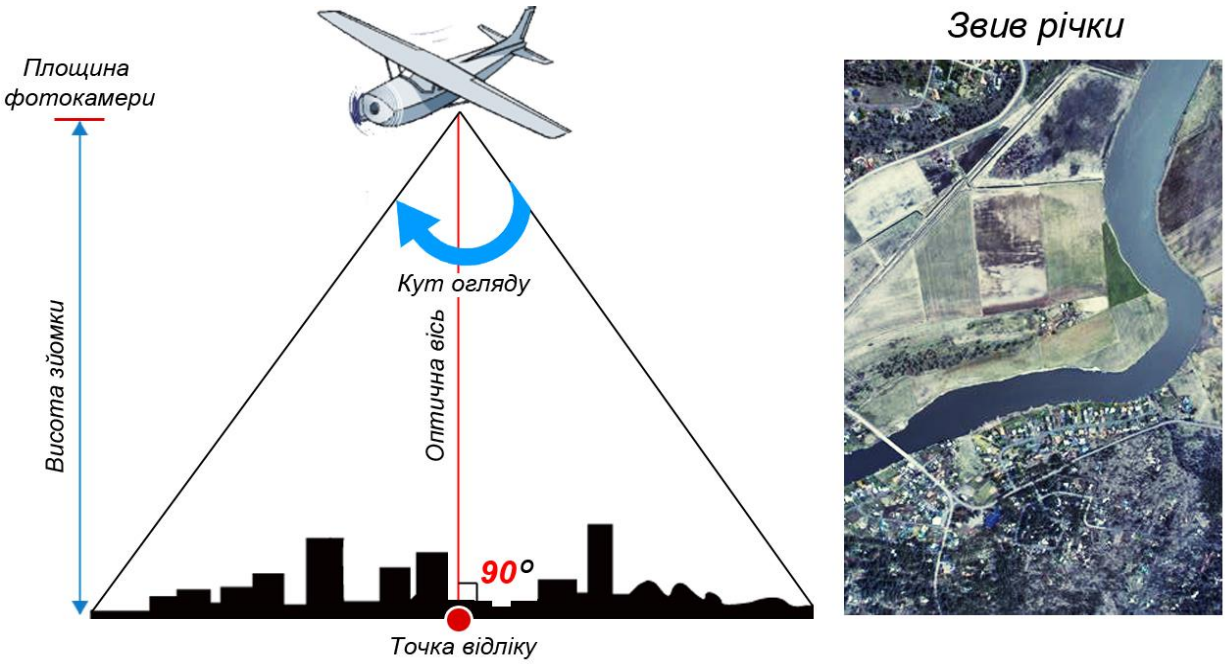


Рис. 8.11. *Планова аерозйомка*

Як уже зазначалось, у процесі польоту за прямолінійним маршрутом аерознімальний літак періодично зазначає відхилення, які характеризуються кутами тангажу, крену і рискання (рис. 8.12).

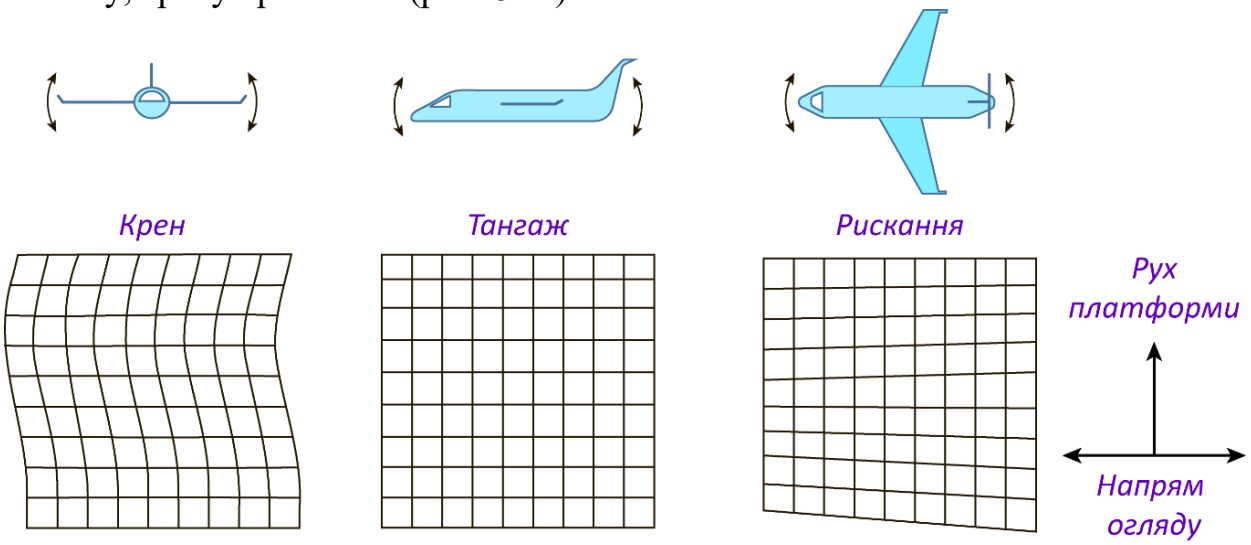


Рис. 8.12. *Коливальні рухи літального апарату – крен, тангаж і рискання та відповідні викривлення зображення під час аерозйомки*

Ці рухи спричиняють відповідні викривлення зображення. Через коливання літака фотоапарат також нахиляється і розвертається.

Правильне положення літального апарата визначається двома способами або симбіозом цих способів. Перший спосіб пов'язаний з використанням глобальної системи позиціонування (GPS), який дозволяє достатньо легко визначити положення літального апарата з точністю до 1 м або навіть краще. Другий спосіб

визначення положення літального апарата – це використання наземних контрольних точок (GCP).

Застосовуючи цей спосіб, можна в режимі безперервного часу визначати положення літального апарата, його орієнтацію та масштаб зображення, а також корегувати викривлення зображення, якщо вони виникають. Як GCP можуть слугувати відбивні маркери, зафіксовані на землі, активні і пасивні радарні приймально-передавачі.

Тому до планових прийнято відносити знімки, кут нахилу (кут огляду) яких не перевищує 2–3°. При такій зйомці на знімках утворюється плоска картина (ортогональна проєкція), яка нагадує зображення на географічних картах. При цьому виді аерофотозйомки можна визначити взаємне розташування об’єктів на площині без урахування їх висот (рис. 8.13).

Рис. 8.13. *Приклад планового аерознімка*

Планові аерознімки широко використовуються в лісовпорядкуванні, пошуку корисних копалин, прокладанні і моніторингу транспортних магістралей, ліній електропередач, трубопроводів, складанні планшетів карт, спільному використанні в топографічній зйомці, фітосанітарному контролі в сільському господарстві, оцінці фотосинтезу зеленої біомаси тощо.

Крім того, планова зйомка може бути використана для моніторингу стану важкодоступних поверхонь, спрямованих угору (дахів, частин мостів, труб, технологічного обладнання, крон дерев, стану льоду і водних поверхонь).

Дешифрування аерознімків, трансформованих фотознімків, фотопланів і фотосхем є одним з основних процесів складання планів і карт. У процесі дешифрування на матеріалах аерофотозйомки пізнаються і викреслюються відповідними умовними знаками з дотриманням вимог генералізації об’єкти і контури місцевості, що підлягають зйомці. Дешифрування може виконуватись методами: польовим, комбінованим, камеральним і аеровізуальним.

Об’єктами дешифрування, наприклад, для потреб землевпорядкування, державного обліку земель і земельного кадастру, є межі, сільські населені пункти, дороги, гідротехнічні споруди, меліоровані землі, сільськогосподарські угіддя, рілля, багаторічні насадження, поклади, сінокоси, пасовища, ліси і чагарники,

болота, елементи рельєфу, невикористовувані в сільському господарстві землі, землі несільськогосподарського призначення тощо.

Фотограмметрична обробка планових аерофотознімків є досить простою. В умовах рівнинної місцевості вона буде полягати перш за все в усуненні спотворень від недотримання вертикального положення оптичної осі фотокамери і від коливань висоти польоту.

Аерозйомка може виконуватися також шляхом сканування, радіолокації земної поверхні або іншими способами. До аерозйомок відносять також різні види геофізичного зондування з літальних апаратів (аеромагнітна, аерогравіметрична, аерогамазйомка тощо).

8.3.2. Перспективна аерофотозйомка

Під час перспективної (оглядової зйомки камера спрямована під кутом до горизонту (рис. 8.14 і 8.15).

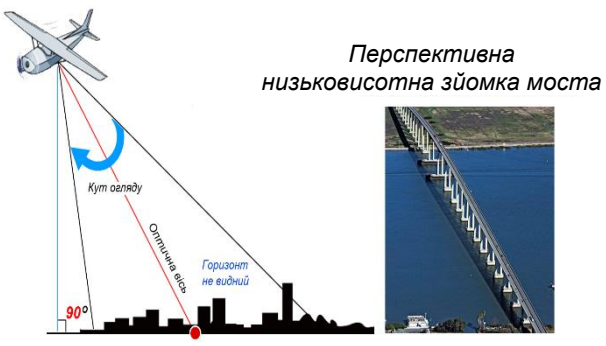


Рис. 8.14. *Перспективна низьковисотна аерозйомка (без горизонту)*

Рис. 8.15. *Перспективна висотна аерозйомка (з наявністю горизонту)*

Такий вид зйомки неможливий для супутників і традиційної "великої авіації". При перспективній аерофотозйомці на знімках утворюється об’ємна картина (аксонометрична проєкція). Видно не тільки дахи споруд, а й бокові поверхні (стіни) (рис. 8.16).

Отже, під час такої зйомки можна побачити не тільки взаємне розташування об’єктів на площині, але і їх форму. Крім того, можна визначати висоту об’єктів відносно один одного.

При певних кутах перспективної зйомки в кадрі може бути присутньою лінія горизонту. В цьому разі утворюється можливість побачити на одному знімку те, як ділянка або споруда вписані в навколишній ландшафт і їх взаємне розташування з віддаленими об’єктами (дальні об’єкти, ліси, водойми, населені пункти).

Перспективна зйомка може використовуватись для одержання фотооснов для 3D-візуалізації споруд, презентації земельних ділянок, об’єктів нерухомості, моніторингу бічних і горизонтальних поверхонь висотних і важкодоступних об’єктів, реклами існуючих об’єктів і споруд тощо.

На основі декількох перспективних аерофотознімків, зроблених поворотом камери навколо вертикальної осі, можуть бути зібрані панорамні знімки, включаючи повні 360º кругові панорами. Створення аерофотопанорам можливе тільки при використанні спеціально обладнаного дистанційно керованого гвинтокрила (БПЛА), здатного надовго зависати в певній точці і на певній висоті, поки здійснюється зйомка суміжних кадрів.

Приклад панорами промислового об'єкта, створеної з низки кадрів аерофотозйомки, подано на рис. 8.17.

Рис. 8.16. *Приклад перспективної аерозйомки промислового об'єкта*

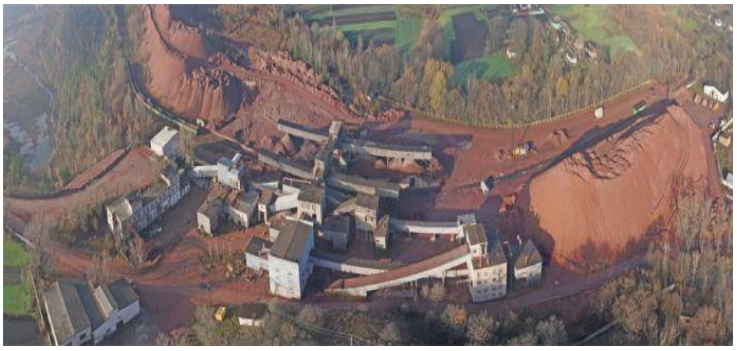


Рис. 8.17. *Приклад панорам промислового об'єкта*

8.3.3. Стереотопографічна аерофотозйомка

Стереотопографічна зйомка є базовою в класичній аерофототопографії, де за аерознімками створюється як рельєфна (висотна), так і контурна (планова) частини карти. Масштаб створюваної топографічної карти (плану) і морфологія об'єкта зйомки є тими головними обставинами, що найбільш суттєво впливають, власне, як на вибір аерофотоапарата (зокрема, величину фокусної відстані), так і режиму зйомки (висота, швидкість, величина перекриттів).

Загальна схема зйомки має такий вигляд, як подано на рис. 8.18. Виконується фотографування місцевості. Знятий фільм проявляють, одержують аеронегативи, які будуть вихідним матеріалом для всіх наступних процесів. Із негативів роблять аерознімки, які мають різні спотворення – кути нахилу, різномасштабність і інше. Для точних вимірювань такі знімки не придатні, їх треба привести до заданого масштабу, усунути різні спотворення, прив'язати до геодезичної мережі.

Одним із завдань аеротопографічної зйомки є отримання знімків для стереотопографічного методу створення карт, тому всі перераховані вище завдання з обробки аерознімків, які потрібно об'єднати до технологічної схеми, безпосередньо належать до цього методу.

Стереотопографічний метод дозволяє знімати в камеральних умовах не тільки контурну частину, але й рельєф місцевості. Він є основним методом створення топографічних карт. Цей метод використовує властивості пари знімків, яка дозволяє отримати модель місцевості у будь-якому масштабі.

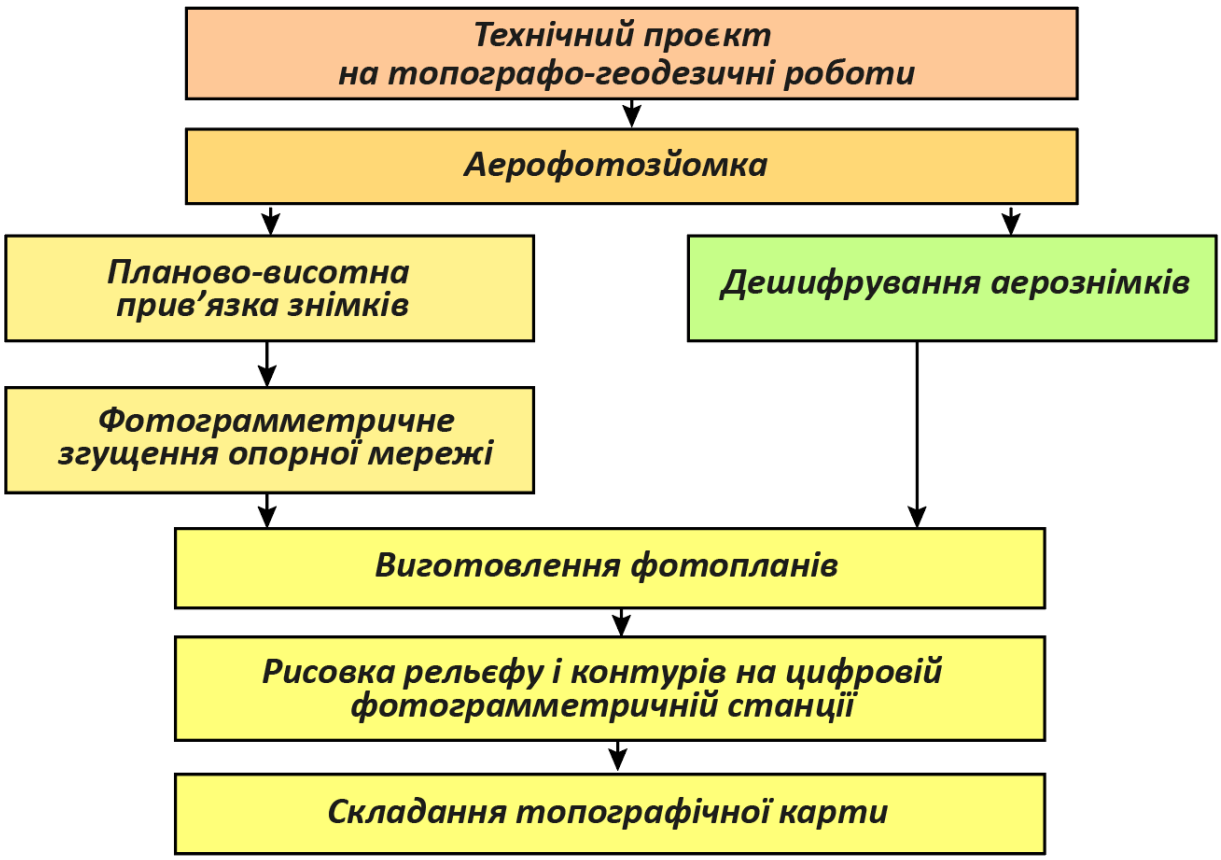


Рис. 8.18. *Технологічна схема стереотопографічного методу складання карт*

8.4. Аерофотозйомка з безпілотних літальних апаратів

Безпілотні технології існують відносно давно. Спочатку вони були складними і доволі дороговартісними комплексами та застосовувались переважно у військовій сфері. Але в останні 10–15 років у цій сфері відбувся реальний прорив. Мініатюризація обчислювальних систем і вдосконалення супутникової навігації (GPS/ГЛОНАСС) дозволили створювати безпілотні літальні апарати (БПЛА), у яких габарити, маса, а головне – вартість набагато менші від попередніх. За доступністю безпілотні технології наближаються до рівня побутових технологій.

БПЛА вважаються досить перспективними засобами для завдань, пов'язаних з одноманітною, брудною або загрозливою діяльністю.

БПЛА поділяють на:

– безпілотні некеровані;

– безпілотні автоматичні;

– безпілотні дистанційно пілотовані літальні апарати (ДПЛА).

БПЛА прийнято класифікувати за такими взаємопов'язаними параметрами, як маса, час, дальність і висота польоту. Виділяють такі класи апаратів:

– "мікро БПЛА" (мБПЛА) масою до 10 кг, часом польоту близько 1 год і висотою до 1 км;

– "міні БПЛА" – масою до 50 кг, часом польоту декілька годин і висотою до 3–5 км;

– середні БПЛА ("міді БПЛА") – масою до 1 000 кг, часом польоту 10–12 годин і висотою до 9–10 км;

– важкі БПЛА – масою більше 1 000 кг з висотою польоту до 20 км і часом польоту 24 години і більше.

Для визначення координат і земної швидкості сучасні БПЛА, як правило, використовують супутникові навігаційні приймачі (GPS або ГЛОНАСС). Кути орієнтації і перевантаження визначаються з використанням гіроскопів і акселерометрів. Програмне забезпечення створюється зазвичай на мовах високого рівня, таких як Сі, Сі++, Модула-2, Оберон SA або Ада 95. Апаратним забезпеченням слугують спеціалізовані обчислювачі на базі цифрових сигнальних процесорів або комп'ютери формату PC/104, MicroPC. Також можуть застосовуватись операційні системи реального часу, такі як QNX, VME, VxWorks, XOberon.

8.4.1. Обладнання для забезпечення аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів

Як правило, сучасні оператори безпілотних літаків використовують у своїй щоденній роботі невеличкий, розмахом до 3 м, безпілотний літальний апарат (БПЛА) зі звичайною, побутовою або студійною фотокамерою на основі ПЗЗ-матриці, найбільш поширеними з яких є Samsung, Sony, Pentax. Фотографії з таких пристроїв придатні для складання планів і схем. Для одержання аерофотознімків більш високої якості використовують фотоапарати типу Canon 550D і великі багатооб'єктивні системи.

Льотно-знімальні роботи, що виконуються фотоапаратом на основі матричного сенсора (ПЗЗ-матриці), здебільшого нагадують традиційний аналоговий метод аерофотозйомки, коли всі елементи матриці одночасно експонуються. В цьому методі внутрішньопіксельна геометрія відома і строго визначена. В матричній технології сьогодні проблема полягає в тому, що великі матричні решітки складні у виготовленні. Тому комбінують: роблять великі за площею решітки з декількох маленьких за площею, наприклад, з чотирьох. Чотирилінзовий об'єктив формує чотири окремі зображення, які трансформують у центральну проєкцію й автоматично стикують. Такі знімки обробляються за існуючими програмами аналітичної обробки.

Другою не менш важливою головною частиною є система визначення положення БПЛА / фотокамери в просторі. В найпростішому випадку це звичайний малогабаритний GPS-приймач з антеною, здебільшого суміщеного типу GPS / ГЛОНАСС. Проте вони не можуть забезпечити потрібну точність. Тому в серйозних апаратах встановлюється додатковий високоточний приймач GPS, який дозволяє при постобробці "сирих" даних визначити координати центру знімка з високою точністю. А якщо цей приймач використовувати разом з наземними базовими GPS-станціями, то точність прив'язки кадрів до координат зростає. Для виконання зйомки створюються базові GPS-станції, дані яких використовуються для обчислення диференціальних поправок при визначенні траєкторії літального апарата.

Для визначення траєкторії літального апарата і уточнення кутових даних інерціальної системи застосовується метод спільної обробки GPS-даних і даних інерціальної системи. Прив'язка знімків до координат, як правило, виконується за допомогою програм, написаних спеціально під конкретний тип приймача і БПЛА. Застосування такого методу розрахунку підвищує як точність визначення кутових параметрів, так і місцерозташування.

Точність GPS / ГЛОНАСС навігації й особливості систем автоматичного управління БПЛА дозволяють досягти таких параметрів при польоті за маршрутом аерофотозйомки:

– поперечне зміщення від осі маршруту – ±10 м;

– утримання БПЛА на заданій висоті – ±15 м;

– відстань від запроєктованого центра фотографування до точки спрацьовування затвора фотоапарата – ±5 м;

– зміна кута крену БПЛА на маршруті між двома знімками – 10°;

– зміна кута тангажа БПЛА на маршруті між двома знімками – 6°.

8.4.2. Технологія безпілотної зйомки

Результатом цифрової аерофотозйомки є цифрові аерофотознімки, а також зафіксовані в польоті елементи зовнішнього орієнтування (лінійні – X_s, Y_s, Z_s – координати центру фотографування; кутові – α, ω, φ_s – орієнтування камери відносно осей координат).

Відповідно до законів центрального проєктування, за якими будується зображення місцевості, аеронегатив (аерознімок) містить низку викривлень, величини яких визначаються кутом нахилу оптичної осі аерофотоапарата і коливанням рельєфу місцевості. Усунення цих викривлень здійснюється в процесі їх комп'ютерної фотограмметричної обробки, і зокрема – фотографічного або цифрового перетворення, що називається трансформуванням. У зв'язку з цим використання аерознімків без їх попереднього трансформування для картографічного (топографічного) забезпечення виконуваних робіт, зокрема як основи ГІС, обмежується впливом зазначених викривлень.

Показання спеціальних приладів і обладнання, зафіксовані в процесі аерофотозйомки, забезпечують стабілізацію знімальної камери в польоті або наступне визначення за ними просторового положення аерознімків в абсолютній чи відносній системі координат з метою наступного їх використання при виконанні фотограмметричних робіт і перетворенні аерознімків на плани і карти. До таких приладів відносять гіроскопи, системи глобального позиціонування, обладнання для визначення висоти польоту, перевищень між центрами фотографування, а також аеронавігаційні системи тощо. Наявність зазначених даних багато в чому визначає технологію камеральної обробки матеріалів аерофотозйомки, істотно впливає на оперативність, точність фотограмметричних побудов і об'єми польових робіт із їх забезпечення.

Прокладення маршруту. Аерофотозйомка буває площинна і лінійна. При проведенні площинної зйомки, крім повздовжнього перекриття знімків, потрібно

ще дотримуватися і поперечного перекриття. Вихідними параметрами фотозйомки за допомогою БПЛА є потрібне розрізнення знімка, розрізнення аерофотоапарата, кут зору об'єктива камери, величина перекриття кадрів. З цих даних розраховується висота польоту, швидкість БПЛА і частота спрацьовування затвора фотокамери.

8.4.3. Оброблення результатів фотографування

Оперативний перегляд результатів аерофотозйомки. В результаті польоту формуються набір фотографій і дані телеметрії, які включають у себе координати центра фотографування, а також кути крену, тангажа і курсу.

Існує три види обробки даних: афінне перетворення кадрів для створення ортофотосхеми рівнинних територій, повне ортотрансформування кадрів для створення ортофотосхеми територій із вираженим рельєфом, повне ортотрансформування кадрів для створення ортофотоплану з виконанням геодезичних вимог по масштабу.

Афінне перетворення кадрів для створення ортофотосхеми рівнинних територій. Програмою визначаються спільні точки (від 50 до 1200) між кожною парою знімків. Після цього розв'язується рівняння, що включає в себе інформацію з усіх знімків, для пошуку мінімуму СКВ (середньоквадратичного відхилення) між усіма векторами, що з'єднують спільні точки. Простіше кажучи, між кожною парою точок натягується резинка, і всі кадри вибудовуються так, щоб загальне натягнення резинок було мінімальним. При цьому кадр може перетворюватись тільки афінно, тобто будь-яка пряма відображається тільки в пряму.

Ортофотосхеми з БПЛА. Програмою визначаються загальні точки (від 50 до 1200) між кожною парою знімків. Після цього розв'язується повне фотограмметричне рівняння з визначенням рельєфу місцевості з точністю до 10 пікселів. При цьому уточнюються координати центра фотографування і параметри орієнтування (крен, тангаж, курс).

Відповідно до розрахованих даних здійснюється ортотрансформування всіх кадрів і проєктування результату на площину. Прив'язка до реальних даних проводиться за існуючими в загальнодоступних картографічних ресурсах даними. Наприклад, за GoogleEarth. Точність цих даних на території України становить близько 6 метрів.

Ортофотоплани з БПЛА. Програмою визначаються загальні точки (від 100 до 3000) між кожною парою знімків. Після цього розв'язується повне фотограмметричне рівняння з визначенням рельєфу місцевості з точністю до 2 пікселів. При цьому уточнюються координати центра фотографування і параметри орієнтування (крен, тангаж, курс) із високою точністю.

Відповідно до розрахованих даних проводиться ортотрансформування всіх кадрів і проєктування результату на площину. Прив'язка до реальних даних здійснюється за результатами наземного обґрунтування, яке включає в себе не менше однієї точки на кожні 10 кадрів або не менше 10 точок на один ортофотоплан. Половина цих точок використовується для прив'язки, друга половина – для підтвердження вимог точності. Точність формування рельєфу при цьому відповідає

вимогам відповідного масштабу. Результатом роботи є файли формату *geotiff* із точністю, що відповідає заданому масштабу. Формат *geotiff* включає в себе два файли – ортотрансформовану аерофотозйомку і цифрову модель рельєфу (DEM – digital elevation model), які можна відкрити в будь-якому програмному забезпеченні ГІС, наприклад ArcGIS чи GlobalMapper. За включеною DEM можна сформувати ізолінії рельєфу з будь-яким перепадом висот.

3D-модель рельєфу місцевості. Разом з DEM є можливість видати рельєф за ізолініями з потрібною точністю. Стандартний формат – векторні лінії формату ArcGIS, які імпортуються в будь-яку картографічну систему. Також є можливість здійснити перехід у місцеву систему координат з WGS.

8.4.4. Первина обробка і контроль якості результатів зйомки

Особливості даних аерофотозйомки з БПЛА. Аерофотозйомка з БПЛА принципово не відрізняється від зйомки з "великих літаків", проте має певні особливості. Політ БПЛА, як правило, здійснюється з крейсерською швидкістю 70–110 км/год (20–30 м/с) в діапазоні висот 300–1500 м. Для зйомки зазвичай використовуються неметричні побутові цифрові камери з розміром матриці 10–20 мегапікселів. Фокусна відстань камер зазвичай становить близько 50 мм (в 35 мм еквіваленті), що відповідає розміру пікселя на місцевості. Фокусна відстань камер зазвичай становить 7–35 см.

Часто знімки з БПЛА обробляються простими нестрогими методами (афінне перетворення знімків на площину). В результаті користувач одержує накидні монтажі, які, крім низької точності, можуть містити розриви контурів на стиках сусідніх знімків.

При значеннях параметрів зйомки, зазначених вище, результати відповідають за точністю ортофотопланам масштабів від 1:500 до 1:2 000 залежно від висоти зйомки. Для строгої фотограмметричної обробки даних аерозйомки й одержання максимально точних результатів потрібно, щоб знімки в одному маршруті мали потрійне перекриття, а перекриття між знімками сусідніх маршрутів при площинній зйомці становило не менше 20 %. На практиці під час зйомки з БПЛА ці параметри витримуються далеко не завжди. Політ БПЛА не є стійким, на нього впливають пориви вітру, турбулентність й інші фактори збурення. Якщо зйомку зі звичайних літаків планують з перекриттям уздовж маршруту 60 %, а між маршрутами 20–30 %, то проєктувати зйомку з БПЛА потрібно з перекриттям уздовж маршрутів 80 %, а між маршрутами – 40 %, щоб, за можливості, виключити розриви в фототріангуляційному блоці.

На БПЛА, як правило, встановлюються цифрові камери Canon. Це пов’язано з легкістю електронного керування камерами цієї фірми.

Використання побутових камер має як переваги (невисока вартість, легкість заміни при "жорсткій посадці"), так і недоліки. Основним недоліком є те, що побутові камери первісно не відкалібровані – невідомі їх точні фокусні відстані, головна точка, дисторсія. При цьому нелінійні викривлення оптики (дисторсія), припустимі під час побутової зйомки, можуть складати до декількох десятків пікселів, що значно зменшує точність результатів обробки. Однак такі камери можуть бути

відкалібровані в лабораторних умовах, що дозволяє отримувати точність обробки, практично таку саму, як і для професійних малоформатних фотограмметричних камер.

Краще встановлювати на такі камери об’єктиви з фіксованою фокусною відстанню. При зйомці треба виставляти фокусування на нескінченність і відключити функцію "автофокусу".

Другий недолік використовуваних на БПЛА камер відноситься конкретно до камер Canon – у них, на відміну від професійних фотограмметричних камер, використовується щілинний затвор, у результаті чого експозиція різних частин зображення здійснюється в різні моменти часу і відповідає різним положенням носія. Так, якщо витримка під час зйомки становить 1/250 с, то при швидкості БПЛА в 20 м/с зміщення камери під час зйомки кадру становить 8 см, що порівняно з розрізненням зйомки на малих висотах і викликає додаткову систематичну похибку в знімку. Такі похибки можуть накопичуватись у процесі фотограмметричного згущення (урівнювання) під час зйомки протяжних територій. Для зменшення впливу цього ефекту і для ліквідації "змазування" знімків потрібно виконувати зйомку з БПЛА з найменшими можливими витримками (не довше 1/250 с, максимальна витримка залежить від висоти). Частково проблему щілинного затвора могли б вирішити камери з центральним затвором, які мають подібну до камер Canon якість об’єктива і матриць. Проте, щоб уникнути "змазування", витримки все-таки доцільно обмежувати.

Знімки цифрових камер, як аматорських, так і професійних, мають прямокутну форму. "Вигідніше" розташовувати камеру так, щоб довгий бік знімка розташовувався впоперек до польоту – це дозволяє знімати більшу площу за тієї ж довжини маршруту.

Зйомку потрібно виконувати з максимальною якістю – з найменшим *jpeg*-стисненням або в RAW, якщо це можливо.

Сучасний рівень розвитку навігаційних засобів дозволяє здійснювати виміри елементів зовнішнього орієнтування (ЕЗО) безпосередньо в процесі зйомки. Типові точності таких вимірів досягають одиниць сантиметрів за просторовими координатами X, Y і Z і 0,005 градуса за кутами крену, тангажу і рискання для найточніших систем Applanix POS AV, що встановлюються на "великі літаки". Найчастіше цього буває достатньо, щоб виконувати обробку без використання опорних точок. У будь-якому разі наявність таких даних значно спрощує обробку і дозволяє виконувати деякі етапи обробки цілком в автоматичному режимі.

Сучасні досягнення мікроелектроніки дозволяють зібрати механічний (точніше MEMS – електронно-механічний) гіроскоп у корпусі розміром декілька мм, вартістю від 250 дол. США. Зрозуміло, що такі гіроскопи не мають точності професійних, мають значні відхилення (близько одного градуса за годину) під час експлуатації, проте істотно спрощують наступну обробку даних.

На жаль, зазвичай на борт БПЛА встановлюють більш дешеві GPS- приймачі і не встановлюють малогабаритні інерціальні системи – IMU-датчики. Дані про центри проєкції знімків у телеметричній інформації знімаються через протокол NMEA і мають у такому разі точність до 20–30 м, а кути тангажа, крену і рискання обчислюються через вектор швидкості GPS-вимірів. Точність кута рискання в такій

телеметричній інформації невисока і може перевищувати 10 градусів, а самі значення містять систематичні похибки, що ускладнює наступну обробку даних. Якщо під час зйомки використовувався дводіапазонний GPS-приймач у диференційному режимі (або PPP-обробка даних GPS), то потрібна буде мінімальна кількість опорних точок для одержання найбільш точних результатів обробки. Зазвичай достатньо 1–2 точки на 100 знімків, у деяких випадках обробку можна здійснювати без опорних точок.

У тому разі, коли відсутні дані про точні центри проєкції, вимоги до планово-висотного обґрунтування стандартні: одна планово-висотна точка на 6–10 базисів зйомки.

Питання метрологічного забезпечення. Загалом, використання БПЛА для аерозйомки і для одержання матеріалів картографічної точності свідчить про економічну ефективність і є оперативним. Для широкого впровадження такої аерозйомки потрібна координація зусиль як виробників БПЛА, так і користувачів, що їх експлуатують, а також розробників цифрових фотограмметричних систем.

Одним із стримувальних чинників упровадження БПЛА для розв'язку вищеперерахованих завдань є відсутність у більшості користувачів практичного досвіду їх використання та теоретично обґрунтованих рекомендацій з вибору знімальної апаратури для БПЛА і параметрів виконуваної за їх допомогою аерофотозйомки.

8.5. Вплив природних умов на якість аерозйомки

Фотозображення ландшафту істотно змінюється залежно від умов освітлення, стану атмосфери, фази вегетації рослинного покриву і ступеня зволоженості земної поверхні. Тому при замовленні аерофотозйомки потрібно враховувати час проведення льотно-знімальних робіт і вказувати їх у заявці.

Вплив вологості. Вологість знижує яскравість (відбивну спроможність) природних об'єктів, особливо м'яких відкладень, не вкритих рослинністю, і створює цим значні контрасти яскравості між сухими і вологими ділянками поверхні однакового речовинного складу.

Якщо аерозйомка проведена на розораних землях, а також у степових і напівпустельних районах навесні, до початку вегетації і повного просихання ґрунту, то глибинні структури, від яких залежить швидкість і ступінь просихання поверхні, "просвічують" крізь пухкі відкладення і гарно дешифруються на аерознімках. Після повного просихання ґрунту контрасти зникають, і на аерознімках, знятих пізніше, виявити ці структури уже неможливо. Різниця вологості зазвичай сприяє виділенню пухких відкладень різного віку і складу.

Вплив умов освітлення. Зазвичай, аерофотозйомка здійснюється в ясну погоду. Однак на висотних аерознімках (> 10 км) і на супутникових знімках зустрічаються зображення хмар і тіней від них. Затінені ділянки є також на аерознімках гірських і лісових районів. У тіні знаходяться круті схили і місцевість біля їх підніжжя (наприклад, дно ущелини). Об'єкти, що залишилися в тіні, як правило, не дешифруються. Тому аерозйомку гірських районів здійснюють тоді, коли площа затінених ділянок найменша, тобто при максимальній висоті сонця.

Від висоти й азимута Сонця залежить і яскравість висвітлених схилів. Звернені до Сонця ділянки висвітлені інтенсивніше від нахилених у протилежний бік, і тим сильніше контраст їх яскравості, чим більша крутизна схилів. Унаслідок цього ранкові і вечірні аерозйомки гірського ландшафту дуже сильно різняться між собою.

Під час аерозйомки плоскорівнинної незаселеної місцевості розглянуті контрасти корисні, тому що вони підкреслюють мікродеталі рельєфу, важко помітні навіть на стереомоделі внаслідок їх плавності. Щоб використати їх, потрібно проводити аерозйомку при малих висотах сонця.

Повітряний серпанок. Шар атмосфери, що перебуває між об'єктивом аерофотоапарата і поверхнею Землі, має певну яскравість, що викликана розсіюванням прямого сонячного світла. Це явище називають повітряним, або атмосферним, серпанком. Повітряний серпанок створює фон, який істотно зменшує контрасти природних об'єктів. Його вплив залежить від висоти фотографування, вологості, забруднення атмосфери і висоти Сонця.

При висоті фотографування до 0,5 км вплив серпанку незначний. При збільшенні висоти до 3 км вплив зростає пропорційно до висоти, далі зростання уповільнюється і, починаючи з висоти 7–10 км, практично зупиняється. Повітряний серпанок знижує контраст між темними об'єктами сильніше, ніж між світлими. Зйомка при висоті Сонця $15–20^0$ навіть за відмінної видимості призводить до того, що більшість темних об'єктів місцевості на знімку зливаються в загальний фон.

Для зменшення впливу серпанку використовують світлофільтри, що відтинають синьо-фіолетову частину спектра. Світлофільтр зменшує вплив серпанку, але усуває його не повністю.

Вибір сезону аерозйомки. Аерознімальний період починається навесні, після повного звільнення поверхні Землі від снігу і паводкових вод, і триває до першого осінньо-зимового снігопаду. Протягом цього періоду аерофотозйомку можна проводити тільки в ясні, безхмарні дні при гарній видимості.

Найбільша висота Сонця досягається в травні, червні і липні та мало змінюється протягом цього періоду. Наприкінці серпня вона в більшості районів стає недостатньою, що є істотним аргументом проти осінніх аерознімань.

Дальність видимості частіше за все зменшується в розпал літа, тобто в червні-липні в рівнинних південних районах, і в липні – в більш північних.

У зоні мішаних лісів для аерофотозйомки найбільш сприятливими є періоди до початку вегетації і повного розвитку листя, а також період його пожовтіння. Аерозйомка під час листопаду або після нього небажана, особливо в районах поширення м'яких порід. Геоіндикаційні особливості деревостою в цей час не проявляються, а опале листя маскує деталі геологічної будови місцевості.

У лісостепу і степу, де значні площі зайняті сільськогосподарськими угіддями, оптимальний період аерозйомки – після оранки до повного висихання ґрунту і появи густого рослинного покриву.

У пустельних і напівпустельних районах аерофотозйомку також краще здійснювати навесні, до повного висихання ґрунту. Можлива й осіння зйомка, коли зволоження ґрунту знову збільшується, а висота Сонця ще достатньо велика.

У високогірних районах аерознімальним періодом є час, протягом якого є мінімальною площа, вкрита снігом. Зазвичай він починається в червні і закінчується в серпні або вересні. Оптимальний термін, враховуючи висоту стояння Сонця, не пізніше середини липня.

Вибір часу доби зйомки. В травні, червні і липні майже у всіх районах України Сонце має висоту близько 40^0 і більше протягом 5–7 годин. Цей період і треба використовувати для зйомки.

У гірських районах із сильно розчленованим рельєфом, де потрібна максимальна висота Сонця, знімальний час обмежується чотирма-п'ятьма годинами в районі полудня.

Великомасштабну аерозйомку рівнинних і слабозаліснених територій, краще виконувати при висоті Сонця $20–40^0$, в ранкові або вечірні години.

8.6. Інформаційні властивості аерофотознімків

8.6.1. Схема передачі інформації під час аерофотозйомки

Повнота і вірогідність дешифрування матеріалів аерофотозйомки залежить від форми передачі інформації і її перетворень, від приладів і способів витягу інформації з первинного документа – аерофотознімка.

Передача інформації – це цілеспрямований процес, у результаті якого інформація передається від одного об'єкта до іншого.

Джерелом інформації слугує вид об'єкта в певний момент часу. На аерофотознімку фіксується світловий потік, що відбивається від об'єктів і підданий масштабним та проєктивним перетворенням. Найчастіше подібність між реальним об'єктом і його моделлю на аерофотознімку порушується. Проте якщо це порушення в припустимих межах, то на аерофотознімку можна розпізнати об'єкти.

До моменту фіксації на плівці світловий потік зазнає викривлень, пов'язаних з атмосферно-оптичними умовами і властивостями об'єктива аерофотоапарата (АФА). Наприклад, наявність слабкого серпанку зменшує інформацію на аерофотознімку до 10–15 %. Об'єктиви АФА викривляють геометричні форми об'єктів через дисторсію і зменшують розрізненність фотозображення (лін/мм). Останнє є основним чинником, що обмежує об'єм інформації на аерофотознімку.

Встановлено, що зміна середньої розрізненності тільки на 1 лін/мм може призвести до зміни кількості інформації до 30 %. Великі втрати інформації відбуваються під час її передавання з негатива на позитив. Також треба враховувати, що фотоплівка має вибіркові властивості. Тому в одному випадку фотографування доцільне в широкій зоні на чорно-білій або кольоровій плівці, а в іншому – у вузькій зоні спектра, наприклад, інфрачервоній.

У результаті аерозйомки утворюється негатив – основне джерело інформації при дешифруванні. Якщо з нього робляться відбитки, то потрібно враховувати інтервал яскравостей, інакше втрата інформації може досягти граничних величин (деякі об'єкти або зникнуть, або не будуть піддаватись розпізнаванню). Контраст між світлими і темними місцями негатива може бути зменшений

деякими прийомами: відтінення аркушами цигаркового паперу, що вкладається на матове скло приладу копіювання; способом "нерізкої маски", коли засвічування відбувається через нерізкий позитив.

Також треба відзначити друк аерофотознімків способом "egda isolated" або "limienfotos" – лінійна фотографія. В цьому випадку відбитки у вигляді абрису, на якому чорними штрихами означаються контури об'єктів або межі між контрастними ділянками, а самі ділянки зображуються світлим тоном незалежно від їх відбивної здатності.

8.6.2. Оцінка можливостей дешифрування аерофотознімка

Під можливістю дешифрування аерофотознімка розуміють їх здатність надавати певну кількість інформації про сфотографовану місцевість.

При цьому розрізняють абсолютну і відносну можливість дешифрування аерофотознімків і окремих об'єктів.

Можливість абсолютного дешифрування аерофотознімка кількісно може бути виражена через їх інформаційну ємність в одиницях інформації.

Якщо аерофотозображення складається з n дискретних елементів і кожний може набувати будь-який з m тонів, то зображення здатне набувати кількість різних станів:

$$N = m^n . \tag{8.1}$$

Зазвичай число N виражають через логарифм і називають інформаційною ємністю J_{max}. Якщо обрано двійкові логарифми, то величина J виражається в одиницях, які називаються "*бітами*":

$$J_{max} = log_2 N = n\ log_2 m. \tag{8.2}$$

Кількість елементарних частинок в 1 мм^2 фотозображення розраховується за формулою:

$$n^1 = (2c)^2, \tag{8.3}$$

де c – середня розрізненність аерофотознімка.

Помноживши n^1 на площу аерофотознімка Р (в мм^2), отримаємо кількість елементарних частинок у ньому:

$$n = P(2c)^2. \tag{8.4}$$

Інформаційна ємність аерофотознімка дає уявлення про їх максимальні можливості, при цьому кількість інформації швидко зростає з підвищенням розрізненності і значно повільніше – зі збільшенням кількості різних тонів.

Можливість відносного дешифрування визначається через відношення корисної інформації (J), яку несе аерофотознімок, до повної інформації, яка може бути отримана за аерофотознімком (J_{max}):

$$D_c = \frac{J}{J_{\max}}.$$

D_c називають ще *коефіцієнтом можливості дешифрування*. Якщо за повну інформацію прийняти інформаційну ємність знімка, то коефіцієнт можливості дешифрування буде показувати завантаженість аерофотознімка надлишковими відомостями або "*рівень шуму*". Можливість відносного дешифрування дозволяє порівняти аерофотознімки, зняті на різній плівці, за різних технічних умов, надруковані на різному папері, тим самим визначаючи цінність знімка як джерела інформації.

Крім названих характеристик, процес дешифрування може бути визначений *повнотою* й *імовірністю*.

Повнота дешифрування – відношення використаної (розпізнаної) корисної інформації (J_1) до всієї корисної інформації, що міститься в даних аерофотознімка (J):

$$G_g = \frac{J_1}{J}.$$

Повнота залежить від підготовки дешифрування, його досвіду і спеціальних знань.

Під імовірністю дешифрування розуміють імовірність правильного впізнавання об'єктів. Вона є відношенням кількості правильно розпізнаних об'єктів (J_2) до суми всіх розпізнаних (J):

$$P_g = \frac{J_2}{J}.$$

Зазначимо, що можливість дешифрування елементарного об'єкта – контуру пов'язана з масштабом зображення. Існують граничні масштаби: дрібний і великий. У першому випадку об'єкт уперше виявляється на аерофотознімку. В другому відбувається зниження можливості дешифрування, оскільки зображення, стаючи доволі великим, розпадається на дрібні елементи і відразу може не сприйматись.

Питання для самоконтролю

1. *На чому ґрунтується аерокосмічне зондування?*
2. *Що розуміють під терміном "аерофотозйомка"?*
3. *Дайте класифікацію аерофотозйомки.*
4. *Як впливають природні умови на якість аерофотозйомки?*
5. *Дайте характеристику планової аерофотозйомки.*
6. *Дайте характеристику перспективної аерофотозйомки.*
7. *Дайте характеристику стереотопографічної аерофотозйомки.*
8. *Дайте характеристику аерофотозйомки за допомогою БПЛА.*
9. *Охарактеризуйте інформаційні властивості аерофотознімків.*

IX. ЦИФРОВІ АЕРОЗНІМАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗЕМЛІ

9.1. Загальні відомості про цифрові аерознімальні системи

На початку 90-х рр. XX ст. значна частина робіт з обробки матеріалів аерофотозйомки була комп'ютеризована. Для цього матеріали зйомки – фотонегативи – оцифровувались за допомогою сканерів. Проте було очевидно, що послідовне використання фотографічної, а потім оптико-електронної систем у процесі цифрування призводить до втрати якості.

У середині 90-х рр. XX ст. за кордоном з'явились перші дослідні зразки цифрових аерознімальних комплексів, які наочно засвідчили, що цифрова зйомка є набагато ефективнішою порівняно з фотографічною.

Вперше повноформатні цифрові камери для аерозйомки були представлені на XIX Міжнародному фотограмметричному конгресі в Амстердамі влітку 2000 р. фірмами Zeiss / Intergraph Imaging (Німеччина / США) і Leica Geosystems (Швейцарія / США). Продукція цих двох провідних конкуруючих компаній досить сильно відрізнялась за принципом дії.

Камера DMC фірми Z/I Imaging була побудована на матричних світлочутливих датчиках, а оскільки одна ПЗЗ-матриця не забезпечувала необхідного розрізнення, то довелось застосовувати декілька датчиків, з яких формувався єдиний кадр. Такі камери прийнято називати *кадровими*.

Leica Geosystems при створенні камери ADS-40 пішла іншим шляхом, застосувавши сканувальний принцип (push-broom), який на той час уже широко використовувався в системах ДЗЗ з космосу, таких як SPOT, LANDSAT, IKONOS тощо. Сутність цього принципу полягала в тому, що замість матричного датчика використовувався лінійний, що давав зображення вузької смуги місцевості упоперек до напрямку польоту.

Повне зображення в такій камері формується безперервною смугою за рахунок руху носія: літака або супутника. Для створення стереоскопічного зображення в ADS 40 використовуються три незалежні канали, що здійснюють зйомку місцевості під різними кутами у напрямку руху літака.

На наступному фотограмметричному конгресі, що проходив у Стамбулі в 2004 р., були продемонстровані ще дві розробки: цифрова камера UltraCam, фірми Vexcel Imaging (Австрія / США), як і DMC, була побудована на комбінації ПЗЗ-матриць, та цифрова камера 3-DAS, спільна розробка НВП "Геосистема" (Geosystem, Україна) та компанії Wehrli and Associates (США) на сканувальному принципі, який використовувався попередньо в камері ADS-40.

9.2. Переваги цифрових аерознімальних камер перед аналоговими

Перехід на цифрові методи аерофотографування обумовлений цілою низкою істотних переваг цифрової аерофотозйомки перед аналоговою і, що особливо важливо, повним переходом на цифрові методи процесів фотограмметричної обробки матеріалів аерофотозйомки:

– одночасна панхроматична, багатоспектральна і стереозйомка;

– висока якість отримуваних зображень за рахунок лінійної передавальної характеристики, високої фотометричної точності, широкого динамічного та спектрального (0,4–1,1 мкм) діапазонів;

– широка смуга огляду в поєднанні з просторовим розрізненням, який навіть перевищує параметри аналогової аерофотозйомки;

– практично цілковита відсутність зашумленності зображень полегшує дешифрування об’єктів і елементів ландшафту, а також дозволяє розширити діапазон масштабів створюваних картографічних матеріалів;

– відсутність процесів фотохімічної обробки, трудомістких операцій створення твердих копій (позитивів на плівці і відбитків на папері) і необхідності спеціалізованих фотолабораторій;

– відсутність процесу перетворення фотознімків на цифрову форму, тобто сканування аерофотознімків;

– відсутність деформації фотоприймача (матриці) і пов’язаних із цим геометричних викривлень аерофотознімків;

– більш висока фотометрична якість, що пов’язана з більшим динамічним діапазоном цифрових знімків, що проявляється в проробці деталей у глибоких "тінях і світлах";

– відсутність необхідності внутрішнього орієнтування знімків за координатними мітками під час фотограмметричної обробки;

– відсутність слідів механічних ушкоджень і пилу на зображенні.

Однак упровадження цифрових методів зйомки вимагало і вирішення широкого кола супутніх завдань. Так, наприклад, достатньо принциповим виявився вибір типу камери: на основі ПЗЗ-матриць чи ПЗЗ-лінійок.

ПЗЗ-матриця (скорочено від "пристрій з зарядовим зв’язком") або CCD-матриця (скорочено від "Charge Coupled Device") [98] є одним з основних елементів цифрових фотоапаратів і фотокамер. Принцип роботи ПЗЗ з ідеєю зберігати і потім зчитувати електронні заряди був розроблений співробітниками корпорації Bell у процесі пошуку нових типів пам’яті для електронно-обчислювальних машин (ЕОМ). Ідея виявилася неперспективною, але здатність кремнію реагувати на видиме світло привела до думки спробувати використати такий принцип для отримання й обробки зображень об’єктів. У 2006 р. Національна академія інженерів (США) нагородила Уїлларда Бойля (Willard Boyle) і Джорджа Сміта (George Smith) премією Чарльза Старка за внесок у винахід та дослідження ПЗЗ-структур у 1969 р. [107]. У 2009 р. обидва винахідники отримали Нобелівську премію з фізики за розробку CCD-матриці, яка відкрила шлях цифровій фотографії та цифровому відео.

Пристрій із зарядовим зв’язком є однорядковою або двовимірною матрицею, кожен елемент якої є мініатюрним електричним конденсатором типу метал-оксид-напівпровідник (МОН) (рис. 9.1).

В основі роботи ПЗЗ лежить явище внутрішнього фотоефекту. При освітленні структури світловим потоком Ф у напівпровіднику генеруються пари носіїв заряду – електрон і дірка. Під дією позитивної напруги (+U) дірки витісняються вглиб напівпровідника, а неосновні носії заряду, електрони, накопичуються в потенціальній ямі. Тут вони можуть зберігатися достатньо тривалий час, оскільки дірок у збідненій зоні немає і електрони не рекомбінують.

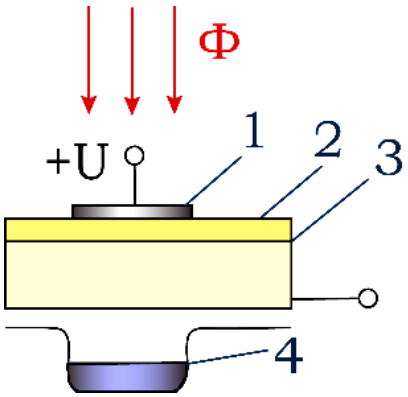


Рис. 9.1. *Елемент ПЗЗ – електричний конденсатор типу МОН: 1 – металевий електрод; 2 – діелектрик; 3 – напівпровідник р-типу; 4 – потенціальна яма, що сформувалася біля площини розділу між діелектриком та напівпровідником під впливом прикладеного до електрода імпульсу позитивної напруги*

Електроди виготовлені з полікристалічного кремнію, який є прозорим майже у всьому видимому діапазоні. Якщо два мініатюрні конденсатори розмістити один біля одного так, щоб їх електричні поля впливали один на одного, потенціальні ями двох конденсаторів стануть зв’язаними, а накопичений заряд потече в глибшу потенціальну яму. Таке перетікання зарядів складає основу принципу дії пристроїв з зарядовим зв’язком.

На рис. 9.2 показано структуру одного елемента – лінійного трифазного ПЗЗ.

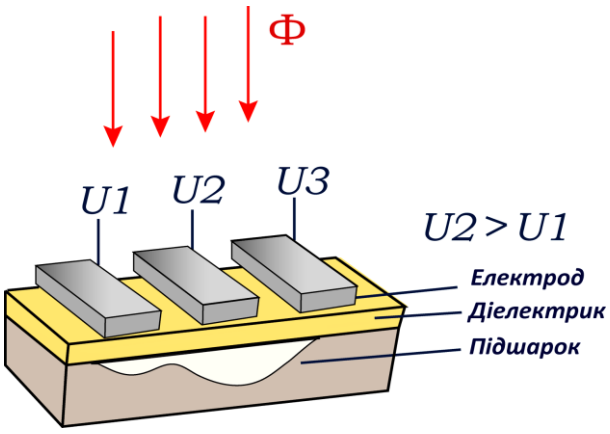


Рис. 9.2. *Елемент трифазного ПЗЗ*

Заряд, нагромаджений під одним електродом, у будь-який момент може бути перенесений під сусідній електрод, якщо його потенціал (U2) буде збільшений, тоді як потенціал (U1) першого електрода буде зменшений. Перенесення в трифазному ПЗЗ можна виконати в одному з двох напрямів (ліворуч або праворуч). Усі зарядові пакети лінійки переносяться в той же бік одночасно.

Двовимірний масив (матрицю) пікселів отримують за допомогою стоп-каналів, що розділяють електродну структуру ПЗЗ на стовпцю.

Стоп-канали – це вузькі ділянки, що формуються спеціальними технологічними прийомами в поверхневій зоні, які перешкоджають розтіканню заряду під сусідні стовпці. Як правило, такі матриці складаються з двох ідентичних секцій – секція накопичення і секція зберігання. Пристрій схематично показаної на рис. 9.3 [33].

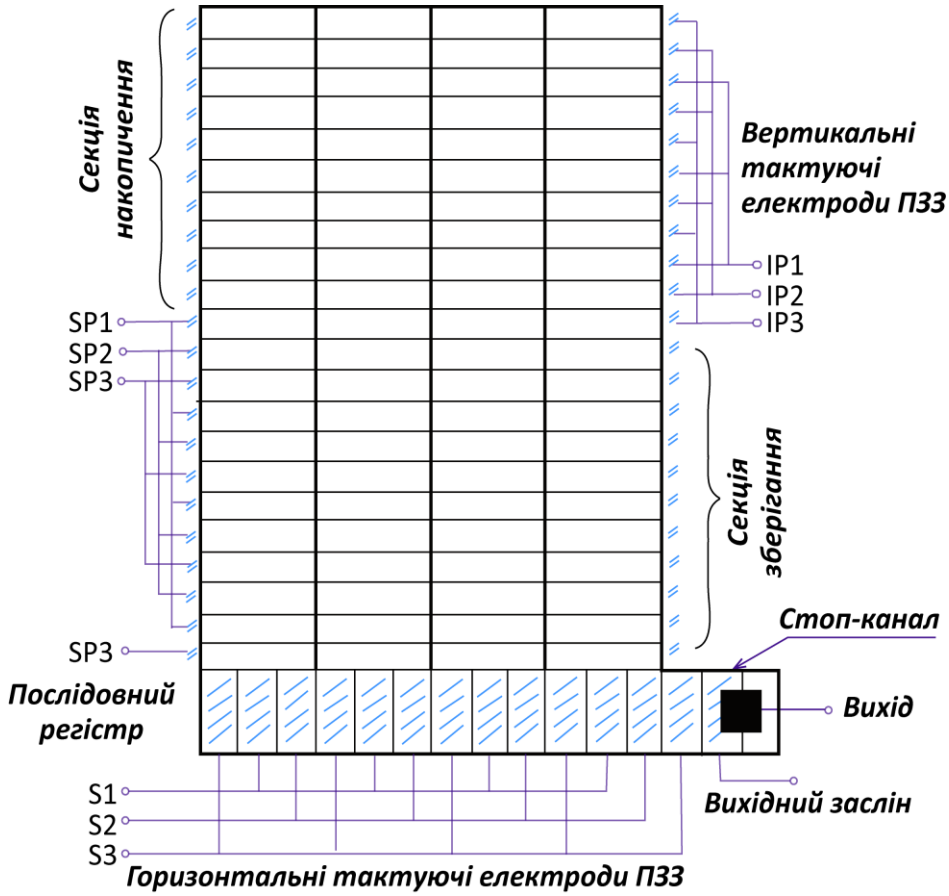


Рис. 9.3. *Структура ПЗЗ-матриці*

Секція зберігання захищена від дії світла світлонепроникним покриттям. Зарядовий рельєф, сформований в секції накопичення, швидко переноситься у секцію зберігання і потім, поки експонується наступний кадр, зчитується порядково у вихідний зсувальний (послідовний) регістр. З послідовного регістра зарядові пакети виводяться один за одним послідовно через вихідний підсилювач, розташований на цьому ж кристалі. У цьому вузлу відбувається перетворення заряду на напругу для подальшої обробки сигналу зовнішньою електронною апаратурою [118; 40].

Існують також матриці, в яких відсутня секція зберігання, і тоді рядкове перенесення здійснюється по секції накопичення. Для роботи таких матриць потрібний оптичний заслін.

Принцип кольоровості ПЗЗ. Набір сенсорів ПЗЗ-матриці відображає рівень яскравості різних ділянок зображення і на виході формується чорно-біле зображення. Для формування кольорового зображення на сенсор накладається світлофільтр. Розподіл таких світлофільтрів по поверхні матриці утворює масив кольорових фільтрів. Принцип дії кольорового фільтру дуже простий: він пропускає світло тільки певного кольору (інакше кажучи, тільки світло з певною довжиною хвилі). Будь-який колірний відтінок можна отримати змішуванням у певних пропорціях декількох основних (базових) кольорів [33].

У найбільш популярній адитивній моделі RGB (Red, Green, Blue) таких кольорів три: червоний, зелений і синій. Колірна модель RGB не єдина, але в переважній більшості цифрових Web-камер використовують саме її.

Найбільш популярними є масиви кольорових фільтрів моделі Байєра, створеної науковим робітником компанії KODAK Брюсом Байєром (Bryce Bayer) в 1976 р. [110], за що його нагороджено Королівським фотографічним товариством (Royal Photographic Society) в 2009 р. [74].

Компанія Eastman Kodak представила принципово нову світлочутливу цифрову матрицю з кольоровими фільтрами моделі Truesense. Вона будується на принципі стандартних фільтрів моделі Байєра, але з додаванням додаткового панхроматичного пікселя або, як називають його у компанії, "clear" – прозорий або безбарвний. Він ефективно сприймає світло відразу в усьому видимому діапазоні, тому вся матриця збирає набагато більшу частину світла, що потрапляє на неї. Така матриця має приблизно в 2–4 рази більшу чутливість порівняно з існуючими зараз моделями і без погіршення якості зображення.

Варіацією фільтра Байєра є RGBE-фільтр від компанії Sony [118]. Тобто до RGB-світлофільтра доданий Emerald – смарагдовий. Теоретично четвертий компонент для визначення кольору вже зайвий. Проте на практиці він трохи наближає колірну гамму зображення до натуральної (для людського ока), покращуючи передачу синьо-зелених і червоних відтінків.

Вище розглядалися мозаїки, в основу яких покладено модель адитивного колірного синтезу (RGB), проте випускаються сенсори з мозаїками (CYM – Cyan Yellow Magenta). Компанія Sony випускає матриці з CYMG-фільтром, основні компоненти в якому – CYM (блакитний, жовтий, пурпуровий) і один, додатковий, адитивний – G (зелений). Типова проблема сенсорів з такою мозаїкою – це погана реєстрація світла в синьому та червоному діапазонах довжин хвиль.

Іншим способом отримання кольорового зображення є використання матриць Foveon X3 [95]. В основу покладено ідею поглинання фотонів різних довжин хвиль на різних глибинах у напівпровіднику. Це дає можливість для кожного пікселя сенсора отримувати свої власні RGB-компоненти, в одному пікселі поєднані детектори усіх трьох колірних компонент. Дуже витончена ідея: вмить позбавляє від колірної інтерполяції, згладжування і різниці фаз між RGB-компонентами.

Метод отримання кольору з використанням 3CCD-матриць – це технологія отримання кольорового зображення, заснована на застосуванні трьох приймачів світла і дихроїдних призм, що ділять світло за спектром на три пучки: червоний, зелений і синій. Кожен із цих пучків прямує на окрему матрицю. Незважаючи на те, що як фотоприймачі можуть бути використані матриці, виготовлені за різними технологіями, єдиним широко поширеним методом стало застосування саме трьох CCD-матриць. Завдяки цій технології вдається помітно підвищити якість зображення, передусім відтворення кольорів, збільшити розрізненність, уникнути кольорових ореолів на краях об'єктів на зображенні.

Практично в кожній напів- і професійній відеокамерах використовується технологія 3CCD. Вона є стандартом професійної зйомки. Такі відеокамери використовуються в операторській справі і придатні для зйомок тележурналістики, репортажів, подій, документальних, корпоративних фільмів, телевізійної продукції тощо. Недоліками камер є складність конструкції і висока вартість [33].

Сигнал з матриці, яка використовує колірний фільтр, надходить у спеціальний процесор для його дешифрування (перетворення його на RGB складові). Сигнали основних кольорів $E`_R$, $E`_G$, $E`_B$ сумуються в певному відношенні для отримання сигналу яскравості E`Y. За наявності цього сигналу, який необхідний для реалізації умови сумісності з чорно-білою системою, не потрібно додаткової передачі по каналу зв'язку трьох сигналів $E`_R$, $E`_G$, $E`_B$. Достатньо передавати будь-які два з них, а інформацію про третій отримати в пристрої декодування відніманням від $E`_Y$ двох інших.

Оскільки сигнал яскравості несе повну інформацію про співвідношення яскравості елементів зображення, то ця інформація може бути виключена з двох інших сигналів. Тому передають тільки три сигнали – яскравості $E`_Y$ і два різницеві сигнали, а саме $E`_{R-Y}$ та $E`_{B-Y}$, оскільки вони мають найкраще співвідношення сигнал / шум. Після цього з цих сигналів формується повний кольоровий телевізійний сигнал [33].

Камери на основі ПЗЗ-матриць дозволяють зберігати центральну проєкцію результуючого знімка, як і у фотографічній апаратурі, але крупноформатні матриці, що забезпечують високу розрізненність і велике охоплення на місцевості, до цього часу відсутні на ринку або мають доволі високу вартість.

Камери на основі ПЗЗ-лінійок дозволяють досягати високого розрізнення і великого охоплення, але проєкція результуючого зображення відрізняється від звичного подання даних аерозйомки. Крім того, для забезпечення високої геометричної точності знімків, отриманих методом сканування, необхідні засоби очного контролю і реєстрації параметрів руху носія знімальної системи – літака або супутника.

Насправді, і перший і другий тип камер на ПЗЗ-структурах мають широкі перспективи використання в космічній і авіаційній техніці.

Сьогодні аерофотознімальне виробництво повністю перейшло на використання цифрових аерофотосистем, витіснивши тим самим з практики використання аналогові (плівкові) аерофотоапарати і перехідні, так звані гібридні фотосистеми. Провідні світові виробники знімальної апаратури різного призначення (фотоапарати, лазерні сканери, тахеометри, супутникове обладнання тощо) пропонують

широкий спектр цифрової знімальної апаратури, повітряного і наземного мобільного базувань, призначеної для одержання інформації про місцевість.

Цифрова аерофотозйомка, що виконується сучасними топографічними аерофотознімальними системами, характеризується істотно більшою продуктивністю, більш високою метричною точністю, високим просторовим і радіометричним розрізненням, дозволяючи отримувати високоякісні як панхроматичні, так і багатоканальні (R, G, B, IR) знімки місцевості для ефективного виконання широкого кола завдань, таких як:

- створення й оновлення цифрових топографічних і спеціальних карт;
- створення 3D-моделей рельєфу і місцевості;
- створення картографічної основи кадастру об'єктів нерухомості;
- екологія і природокористування (сільськогосподарське і лісове господарство);
- моніторинг різного типу об'єктів;
- реагування на надзвичайні ситуації;
- створення візуальних інформаційних систем.

Основними сферами застосування цифрових аерознімальних комплексів є такі:

– топографічне і тематичне картографування та складання кадастрів населених пунктів і територій;

– вишукування під час будівництва будівель, споруд, транспортних, електроенергетичних і комунікаційних мереж, нафто- і газопроводів тощо;

– планування розвитку інфраструктури міських територій, транспортних, енергетичних і комунікаційних мереж;

– матеріали для роботи страхових компаній, включаючи випадки спостереження за розвитком і наслідками надзвичайних ситуацій;

– моніторинг зон видобутку природних копалин;

– моніторинг зон обробки і транспортування нафто- і газопродуктів;

– картографування, складання кадастру і контроль стану лісових угідь;

– картографування і складання кадастру с/г угідь;

– моніторинг стану посівів і пасовищ, оцінка урожайності;

– моніторинг поширення шкідників і хвороб рослинності;

– оцінка водних ресурсів і витрати води;

– моніторинг забруднення водних артерій стоками з с/г полів і міст;

– моніторинг шельфової зони, включаючи забруднення акваторії і прибережної зони;

– моніторинг розвитку берегової лінії і портів тощо.

9.3. Класифікація цифрових аерофотоапаратів

Ведучи мову про характеристики і параметри сучасних цифрових топографічних аерофотоапаратів, низка авторів пропонує базовий набір критеріїв оцінки їх продуктивності і якості (табл. 9.1) [104].

Таблиця 9.1

Набір користувацьких критеріїв оцінки продуктивності і якості сучасних цифрових аерофотоапаратів

Фотографічна якість	динамічний діапазон, інтенсивність шумів, якість передачі кольорів
Фотограмметрична якість	стабільність параметрів внутрішнього орієнтування, досяжна точність виконання фототріангуляції
Продуктивність	за кількістю інформації – в мегабайтах/сек; за площею територія картографування – в км/час
Технологічність	можливість адаптації традиційних технологічних процесів, наявність кваліфікованого персоналу

Усі сучасні (особливо широкоформатні) цифрові аерофотоапарати характеризуються певним набором загальних параметрів, а саме:

– *використання CCD* (ПЗЗ) *приймачів випромінювання*, матричного або лінійного типу;

– *використання синтезованого кадру* (для широкоформатних аерофотоапаратів), тобто результуючий кадр системи формується з набору субкадрів, що відповідають окремим CCD-матрицям (лінійкам) приймачів;

– *включення до складу комплексу модулів інерціальної навігації IMU і систем супутникового геопозиціонування* GPS і (або) ГЛОНАСС для визначення просторових лінійних і кутових елементів зовнішнього орієнтування знімків;

– *широкий радіометричний діапазон кодування фотозображень* (12–14 біт);

– *наявність електронної компенсації зсуву зображення* протягом часу експозиції;

– *використання гідростабілізації* для підтримки планового положення апарата в процесі зйомки.

Разом з тим сучасні цифрові аерофотоапарати розрізняються за цілою низкою параметрів, головними з яких є такі:

• геометрія приймача – матриця CCD або лінійка CCD;

• метод синтезу кадру;

• спосіб компенсації "змазу" – механічний або електронний;

• фокусна відстань основного оптичного каналу в одиницях розміру матриці.

Перші дві зазначені відмінності мають концептуальний характер і в значному ступені визначають "ідеологію" як самих аерофотоапаратів, його конструктивних особливостей, так і методик фотографування і наступної фотограмметричної обробки.

В табл. 9.2 подано один з традиційних підходів щодо класифікації цифрових аерофотоапаратів, коли основним критерієм виступає розмір результуючого кадру (аерофотознімка), що виражається числом елементів матриці $N_x \times N_y$. Цей підхід прийшов з класичної класифікації аерофотоапаратів за розміром кадрового вікна, що змінювалось від 6х6 до 23х23 см.

Таблиця 9.2

Класифікація цифрових аерофотоапаратів за розміром результуючого кадру

Клас аерофотоапаратів	Розмір результуючого кадру в мегапікселях, Мп
Малоформатні	до 64
Середньоформатні	до 90
Суперсередньоформатні	90–140
Великоформатні	понад 150

Малоформатні цифрові камери активно використовувались для аерознімальних цілей до кінця 90-х рр. XX ст. Зараз їх роль досить обмежена. Вони використовуються головним чином при аерофотозйомці на дронах.

Середньоформатні цифрові фотограмметричні камери сьогодні є основним інструментом одержання цифрових геопросторових даних з авіаційних носіїв. Головним аргументом на користь камер цього типу є їх "помірна" цінова ніша, компактність, мале енергоспоживання і, як наслідок, можливість швидкої адаптації до існуючих носіїв. Такі камери керуються за допомогою звичайних комп'ютерів, які найчастіше використовуються і як засоби накопичення аерофотознімків.

Крупноформатні цифрові аерофотосистеми використовуються головним чином у аеротопографічному виробництві для зйомки значних за площею ділянок земної поверхні з метою створення цифрових карт і планів. Ці системи мають максимальну продуктивність, найвищі геометричні і радіометричні властивості і характеризуються максимальним ступенем автоматизації всіх етапів аерознімального процесу.

9.4. Особливості формування кадру в цифрових АФА

За способом формування зображення (результуючого кадру) цифрові аерофототопографічні системи поділяються на прилади:

1) з окремим матричним приймачем (matrix);

2) з композитним приймачем, що складається з декількох фізичних матричних приймачів;

3) з приймачем у вигляді одного чи декількох CCD-приймачів лінійного типу. Приймачі такого типу називають також лінійками. Головне, що на відміну від матриці, такі приймачі мають одномірну структуру.

Якщо перші два типи аерофотоапаратів, як уже зазначалось попередньо, можна назвати кадровими, оскільки формують традиційний аерофотознімок квадратної або прямокутної форми, то аерофотоапарати третього типу кадровими не є. В їх конструкції закладений принцип формування кадру за допомогою накопичення безперервної послідовності смуг зйомки, якому більше підходить назва "смуга".

В системах кадрового типу принцип формування зображення може розглядатись як традиційний, заснований на законах центральної проєкції (рис. 9.4).

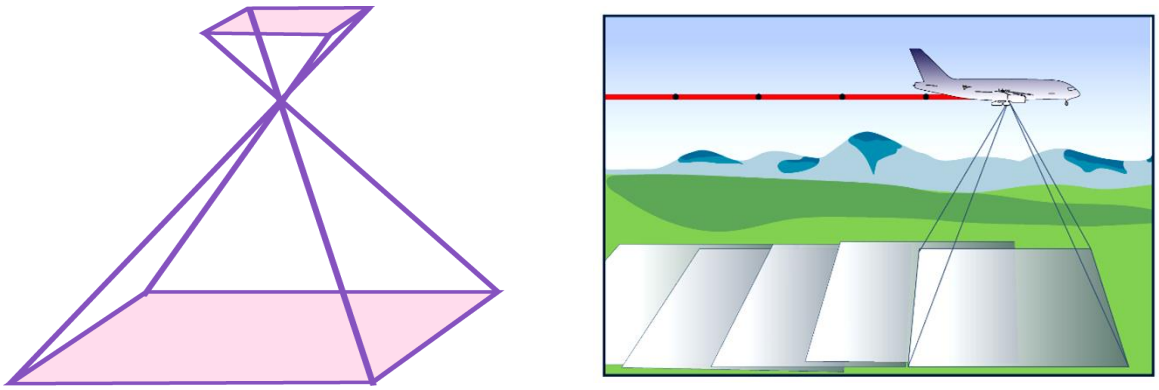


Рис. 9.4. *Принцип створення знімка в кадровій системі центрального проєктування на одну матрицю*

Кадрові цифрові знімальні системи є основними для аерофотографічної зйомки, в яких реалізований принцип формування знімка у вигляді центральної проєкції, що лежить в основі стереофотограмметричного методу створення топографічних карт за знімками. Ця ситуація ілюструється на рис. 9.5, де в цифровому кадровому аерофотоапараті з центру проєкції одномоментно (за час експозиції) формується знімок зв'язкою проєктувальних променів у площині CCD-матриці. Тобто зображення будується одночасно по всій площі кадрового вікна. Така схема формування цифрового знімка характерна для перших великоформатних цифрових аерофотоапаратів, у яких неможливість створення дуже великих CCD-матриць компенсувалась створенням композитного, складового приймача. Як показано на рис. 9.6, зображення, сформовані на кожному матричному приймачі, мають спільні частини, що перекриваються.

Рис. 9.5. *Одночасна побудова зображення по всій площі кадрового вікна*

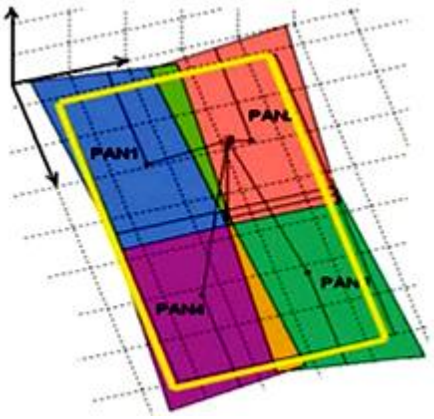


Рис. 9.6. *Схема формування знімка в кадровій системі з композитним CCD-приймачем, що складається з декількох фізичних матричних приймачів*

Використовуючи спільні точки, розпізнані на ділянках перекриття окремих знімків, окремі кадри поєднуються в єдиний знімок значних розмірів (понад $150 \cdot 10^6$ пікселів).

У широкоформатних кадрових цифрових аерофотоапаратах DMC, UltaCAM, UltaCAM D, UltraCam Eagle поряд з основним панхроматичним кадром високого розрізнення формуються чотири "спектральні" (зелене, синє, червоне, ближнє інфрачервоне) зображення.

Зрозуміло, що поля зору панхроматичного і "кольорових" сенсорів збігаються, що дозволяє "синтезувати" повноформатне кольорове RGB або спектрозональне зображення (рис. 9.7).

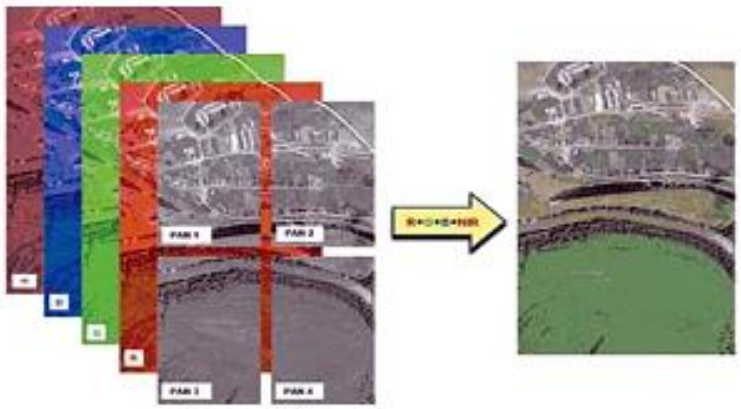


Рис. 9.7. *Формування кольорового композитного зображення*

З математичної точки зору така процедура є ніщо інше, як інтерполяція, яка дозволяє штучно "розфарбувати" всі пікселі зображення за фактично зафіксованою кольоровістю сусіднього пікселя або групи пікселів (метод рознесених спектральних каналів). Проте низка учених бачать у таких методах формування кольору джерело безлічі негативних моментів, зокрема, виникнення ефекту бахроми (fringe) й інших явищ, що ускладнюють візуальний аналіз аерофотознімків і проведення камерального дешифрування. При синтезі спектрозонального зображення будуть використані значення спектральних інтенсивностей випромінювання, що відповідають різним поверхням з недифузійною індикатрисою розсіювання.

З урахуванням викладеного можна стверджувати: апарати кадрового типу, що гарантують одномоментність одержання даних, як у панхроматичному, так і всіх спектральних (колірних) каналах і відсутність викривлень, викликаних недифузною індикатрисою розсіювання, заслуговують на більшу довіру у питаннях достовірності передачі кольорів.

Одержання кадру (сцени) може бути реалізоване і лінійним матричним приймачем, розташованим у фокальній площині аерофотоапарата, що працює за принципом класичного щілинного фотографування. Такий підхід реалізується знімальними системами космічного базування, проте застосовується також і в аерофотоапаратурі, за якою закріпилась назва лінійного сканера.

В основі системи лінійного сканера лежить концепція трилінійного сканера, що була вперше запропонована ще в 1970 р. і яка активно використовувалась компанією DLR (Німецький аерокосмічний центр) в аеро- і космічних системах дистанційного зондування. Відповідно до цієї концепції, у фокальній площині об’єктива системи паралельно розташовані три ПЗЗ-лінійки, що знаходяться одна

від однієї так, що одна з них забезпечує панхроматичну зйомку в напрямку "вперед", друга – в напрямку точки надира, а третя – в напрямку "назад". На рис. 9.8 (праворуч) показано схему сканерної зйомки місцевості трьома лінійками сенсорів, розташованих у фокальній площині об'єктива і позначених 1, 2, 3.

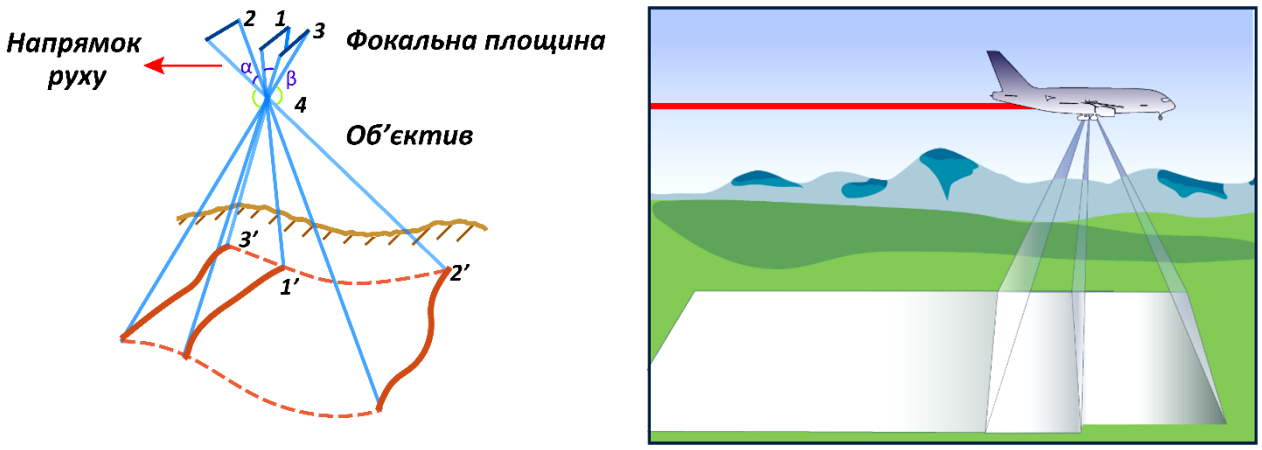


Рис. 9.8. *Принципова схема роботи лінійного сканера*

Відповідно, сліди (проєкції) сенсорів на поверхні сцени позначені на рис. 9.8 як 1, 2, 3. Кожний такий слід відповідає одній лінії сканування, що отримується одночасно. Частота сканування (зйомка інформації з лінійки) достатньо висока і, наприклад, в аерофотосистемі ADS-40 може становити 800 Гц. Послідовна часова сукупність лінійок формує безперервне зображення знімка (смугу, сцену), окремо для кожного лінійного сенсора. Для прикладу, поданого на рис. 9.8, маємо три смуги, що відповідають трьом зонам оптичного спектра.

Для виконання однаковості повздовжнього і поперечного розрізнення потрібен узгоджений вибір значення частоти сканування F, висоти зйомки H і швидкості руху носія W. Тобто

$$F = \left(\frac{W}{H}\right) \cdot f \, .$$

У лінійних сканерах, як і в кадрових цифрових системах, використовуються "спектрозональні" сенсори з розрізненням меншим, ніж у основного монохромного каналу. Тому все вищесказане про проблеми інтерполяції кольору в кадрових системах однаковою мірою справедливе і по відношенню до лінійних сканерів. Природність кольоропередачі в лінійних сканерах при уважному розгляді також виявляється порушеною.

При синтезі спектрозонального зображення будуть використані значення спектральних інтенсивностей випромінювання, що відповідають різним кутам візирування. Це несприятлива обставина, особливо для поверхонь з істотно недифузійною індикатрисою розсіювання.

З урахуванням вищевикладеного можна стверджувати, що апарати кадрового типу, які гарантують одномоментність отримання даних як панхроматичним, так і всіма спектральними (колірними) каналами і відсутність викривлень,

викликаних недифузною індикатрисою розсіювання, представляються таким, що заслуговують більшу довіру в питаннях достовірності передачі кольору і геометрії зображення.

9.5. Радіометричне і просторове розрізнення в цифрових АФА

Радіометричне розрізнення (англ. *radiometric resolution*) зображення визначається кількістю відтінків між абсолютно чорним і абсолютно білим і виражається в бітах на піксель. Наприклад, при 8-бітному радіометричному розрізненні кожний піксель зображення може мати $2^8 = 256$ градацій (від 0 до 255, де 0 – це чорний колір, 255 – білий, а все, що між ними, – відтінки сірого) (рис. 9.9).

Сучасні супутникові знімки найчастіше надходять з великим радіометричним розрізненням, наприклад, 16 біт, де кожний піксель може набувати $2^{16} = 65536$ значень і, відповідно, на такому знімку можна розпізнати більшу кількість об'єктів.

Це важливо у випадках зйомки об'єктів, що перебувають в тіні, або коли на знімку одночасно знаходяться великі водні поверхні і суходіл.

Крім того, якщо сенсори мають радіометричне калібрування, наприклад, AVHRR, це дозволяє виконувати точні кількісні виміри.

а) 8 біт (256 градацій сірого)

б) 11 біт (2048 градацій сірого)

Рис. 9.9. *Цифрові аерофотозображення з розрізненням*

9.6. Основні тактико-технічні характеристики цифрових АФА

В табл. 9.1 наведено основні тактико-технічні характеристики [6] сучасних цифрових аерофотознімальних систем.

Питання для самоконтролю

1. *Назвіть переваги цифрових аерознімальних камер перед аналоговими.*
2. *Дайте класифікацію цифрових апаратів.*
3. *Назвіть особливості формування кадру в цифрових АФА.*
4. *Охарактеризуйте радіометричне розрізнення цифрових АФА.*
5. *Охарактеризуйте просторове розрізнення цифрових АФА.*
6. *Перерахуйте основні тактико-технічні характеристики цифрових АФА.*

Таблиця 9.1

Середньоформатні цифрові камери для аерофотозйомки

Модель	К-ть об'єктивів	К-ть CDD-сенсорів	Формат CDD-сенсорів, мм	Розмір пікселя, мкм	Кількість пікселів уздовж / упоперек маршруту	Геометрія	Фокусна відстань, мм	Кути поля зору (у всіх діапазонах) уздовж / уоперек маршруту
DiMAC Light+, DiMAC ULTRALiGHT+	1	1	53,9 × 40,4	6	8984 × 6732 (60 МП)	Центральна проєкція	70 120 210	42°/32° 25°/19° 14°/11°
DigiCAM-H60	1	1	40,2 × 53,7	6	8956 × 6708 (макс) (60 МП)	Центральна проєкція	28, 35, 50, 80, 100, 150, 210, 300	70°/86°, 59°/74°, 44°/56°, 27°/36°, 23°/30°, 15°/20°, 11°/15°, 8°/10°,
RMK-DX	5	5 (1 – панх., 4 – мульти-спектр)	80,64 × 84,32	7,2	11200 × 11712 (131 МП)	Центральна проєкція	92-панх.; 45-мультиспектр.	47,3°/49,2°
RCD30	1	1 (змінний)	64,48 × 48,29	6	8956 × 6708 (60 МП)	Центральна проєкція	50, 80	43°/65°
DSS WideAngle	1	1	53,9 × 40,4	6	8984 × 6732 (60 МП)	Центральна проєкція	32, 50 (40, 60, 250)	75°/60° (35 мм); 57°/44° (50 мм)
TAC 80MP	1	1	53,9 × 40,4	5,2	7760 × 10328 (макс)(80 МП)	Центральна проєкція	50, 60, 72 (за запитом 28, 32, 47, 100)	44°/56,5° (50 мм); 37,2°/48,3° (60 мм); 31,3°/41° (72 мм)
UltraCamLp	4	4 (2 PAN, 1 RGB, 1 NIR)	67,9 × 47,5 – PAN; 31,9 × 21,6 – RGB, PAN	6	7920 × 11704 (92 МП)	Центральна проєкція	70	37°/52°

Таблиця 9.2

Середньоформатні цифрові камери для аерофотозйомки

Варіант	1	2	3	4	5	6
Назва моделі	DMC II $_{250}$	ADS 80	UltraCam Eagle	A3 Edge	CS-15000	Quattro DigiCAM
Фірма-виробник	Z/I Imaging підрозділ Hexagon AB (Швеція)	Leica Geosystems підрозділ Hexagon AB (Швеція)	Microsoft-Vexcel Imaging GmbH підрозділ Microsoft Corporation (США)	Visionmap Ltd. (Ізраїль)		
Тип камери	Кадрова камера	Сканерний авіаційний сенсор	Кадрова камера зі змінною системою об’єктивів	Кадрова камера плавного обертання з високою швидкістю зйомки	Кадрова камера	Кадрова модульна камера
Маса, кг	68, включаючи накопичувач	49–52 (залежно від IMU); 2,5 (накопичувач)	75–80 (включаючи комп’ютер і накопичувач)	38 (загальна маса системи)	37 (корпус + модуль камери)	37,7 (включаючи комп’ютер і накопичувач)
Оптичні характеристики						
Кількість об’єктивів	5	1	8 (4 PAN+3 RGB+1 IR)	2	2	4
Кількість CCD-сенсорів	5 (1 – PAN, 4 – MS)	SH91: 8 лінійок (4 PAN, 4 MS) SH92: 12 лінійок (4 PAN, 8 MS)	9	2	2	4
Кількість фрагментів результую-чого кадру	1	Зйомка ведеться безперервно	9	змінювана	2	4

Продовження таблиці 9.2

Принцип експонування сенсорів	**Синхронний**	**Зйомка лінійним сенсором**	**Послід. формування кадру з використанням масиву з 9 сенсорів CCD**	**Н/д**	**Н/д**	**Синхронний**
Розмір пікселя, мкм	5,6 (PAN); 7,2 (MS)	6,5	5,2 (PAN)	5,5	5,2	6
Фокусна відстань (для результуючого кадру), мм	112 (PAN); 45 (MS)	65	Сист. об'єктивів 1:80 (PAN), 27 (MS) Сист. об'єктивів 2:210 (PAN), 70 (MS)	300	70, 120, 210	80, 100, 150, 210, 300
Кути поля зору (у всіх діапазонах) уздовж / упоперек маршруту (для результуючого кадру	38,6º/45,5° (PAN); 54,2º/52° (MS) 8°/10° (300 мм)	– / 64° напрямок огляду лінійок: 27° forward, 14° back, 2° forward, 0	46°/66° (Система об'єктивів 1) 20°/28° (Система об'єктивів 2)	111,28° (макс. упоперек маршруту)	37°/29° (70 мм); 23°/18° (120 мм); 14°/11° (210 мм)	Для одного модуля: 27°/36° (80 мм); 23°/30° (100 мм); 15°/20° (150 мм); 11°/15° (210 мм)
Радіометр. розрізнення, біт/піксель	14	12	> 12	12	н/д	16
Мінімальний інтервал фотограф., с	1,8	Зйомка ведеться безперервно	1,8	н/д	2	1,6
Спектральні діапазони (нм)	PAN, R, G, B, NIR	PAN, R, G, B, NIR	PAN, R, G, B, NIR	R, G, B, (NIR)	R,G,B – стандарт NIR – опція	R, G, B
Компенсація зсуву (змазку) зображення	Є: ВЗІ (TDI)	Не потрібна	Є: ВЗІ (TDI)	Є трьох типів: FMC, RMC, VC	Є, електронно-механічна	Є, електронна

Продовження таблиці 9.2

Характеристики сенсора						
Кількість пікселів результуючого кадра вздовж / упоперек маршруту	14656 × 17216 (PAN); 6846 × 6096 (MS)	Визначається довжиною маршруту / 12000 (R, G, B та NIR) і 12000 або 24000 (PAN)	13080 × 20010 (PAN) 4360 × 6670 (MS)	10200 × 80500 (макс.)	10000 × 15000	
Геометрія результуючого зображення	Центральна проєкція	Центральна проєкція кожного рядка зображення	Інтегрований кадр за даними від 9 CCD	Квазіпанорамний знімок – для візуалізації. Стандартна центр. проєкція – для вимірів / векторизації	Центральна проєкція	Центральна проєкція
Формат растрового зображення	8, 12, 14 або 16 біт TIFF, можливість додаткового JPEG стиснення	8 або 16 біт TIFF, можливість додаткового JPEG стиснення	JPEG, TIFF (8 або 16 біт)	JPEG2000, TIFF	TIFF, JPEG	TIFF, JPEG, DNG (8 або 16 біт
Накопичувач даних зйомки						
Тип накопичувача даних	Твердотіла пам'ять (SSD)	Твердотіла пам'ять (SSD)	Твердотіла пам'ять (SSD)	Твердотіла пам'ять (SSD)	Твердотіла пам'ять (SSD)	Твердотіла пам'ять (SSD)
Ємність накопичувача даних, Тб	2,6	0,98	3,3	на 8-9 годин безперервної зйомки	4 накопичувача по 0,3 (стандарт), 0,6 (опція)	2
Можливість зміни накопичувача в польоті	Є	Є	Є	Є	Є	Є
Можливість перегляду даних у польоті	Є	Є	Є	Є	Є	Є
Зовнішній вигляд						

X. ШТУЧНІ СУПУТНИКИ ЗЕМЛІ, ЇХ ОРБІТИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ

Космонавтика суттєво змінила традиційні погляди на шляхи вивчення Землі та інших космічних тіл і відкрила нові напрямки подальшого прогресу науки та промисловості. Сьогодні супутникова техніка та супутникові технології знаходять використання в астрономічних, астрофізичних та медико-біологічних дослідженнях, радіозв'язку та телебаченні, навігації, геодезичних вимірюваннях, картографуванні та вивченні природних ресурсів, метеорологічному прогнозуванні, екології навколишнього середовища тощо.

Завдяки надзвичайно широким можливостям супутникових технологій протягом останніх десятиріч у світі спостерігається стала тенденція постійного технічного та технологічного вдосконалення супутникових засобів, зростання обсягів ринку послуг та кількості користувачів і, як наслідок, поширення товарообігу світової супутникової індустрії.

Основні переваги ДЗЗ за допомогою супутників, як відомо, полягають у глобальності по відношенню до охоплення земної поверхні, періодичності по відношенню до часу і оперативності по відношенню до надходження інформації, тому супутникове знімання земної поверхні протягом останніх 40 років стало лідером серед дистанційних методів дослідження.

10.1. Класифікація супутників для ДЗЗ

Супутникову зйомку виконують з висоти від 100 до 1000 кілометрів, тобто при русі носія апаратури поза атмосферою, в космічному просторі. Її ведуть з ракет, пілотованих космічних апаратів і орбітальних станцій, автоматичних штучних супутників Землі та інших космічних апаратів. На відміну від аерозйомки, зйомку з космосу здійснюють з певної орбіти, параметри якої найчастіше відомі. Це дозволяє визначати положення супутника в момент зйомки. Останнім часом точне положення супутника реєструють також за допомогою приймачів супутникового позиціонування GPS.

Чим нижче орбіта, тим детальніше спостереження, але більш короткий час існування супутника. На орбітах заввишки 200–400 км (на більш низькій орбіті супутник швидко згорає) працюють супутники з апаратурою для детальної фотографічної зйомки, а також важкі пілотовані кораблі й орбітальні станції, а на висотах 500–2000 км – супутники для оперативної зйомки, зазвичай менш детальної (метеорологічні, ресурсні).

ШСЗ залежно від виконуваних завдань поділяють на *науково-дослідні* і *технічні*.

Науково-дослідні супутники поділяються на:

– *геофізичні* (для дослідження верхніх шарів атмосфери і ближнього космічного простору);

– *астрономічні* (для спостережень за зірками, планетами і Сонцем);

– *геодезичні* (для визначення місця розташування об'єктів із субсантиметровою точністю в загальноземній системі координат, з центром у центрі мас землі, що в свою чергу дає можливість виконувати такі геодезичні завдання, як: вивчення тектонічної активності земної кори, інвентаризація земельних ділянок, будівництво, створення опорної або державної геодезичної мереж та багатьох інших);

– *метеорологічні* (для визначення циркуляції атмосфери і процесів формування погоди);

– *ресурсні* (для всебічного дослідження Землі (наприклад, американський "Landsat", французький "Spot" та інші).

За допомогою науково-дослідних ШСЗ виявлені й досліджуються *радіаційні пояси Землі* (рис. 10.1).

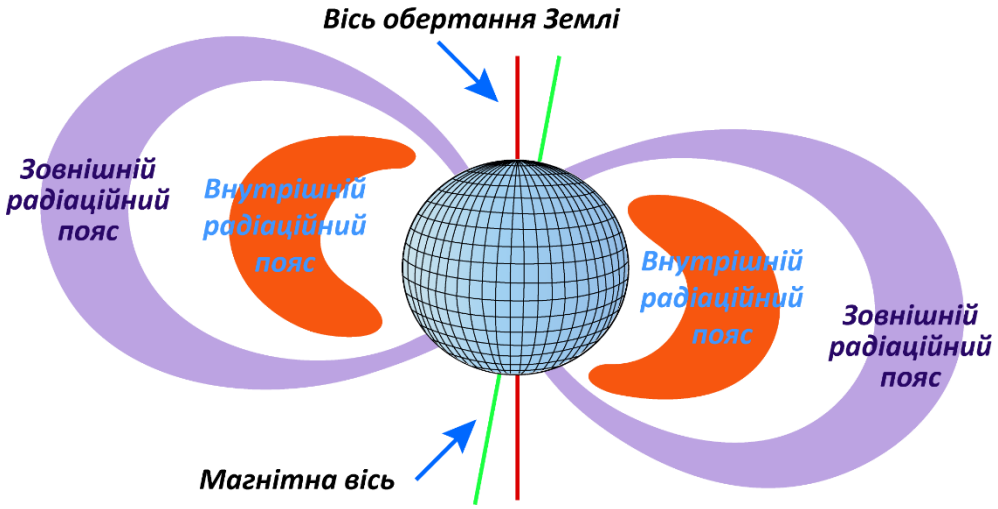


Рис. 10.1. *Радіаційні пояси Землі*

Поряд з космічними зондами ШСЗ дозволили досліджувати структуру *магнітосфери Землі* й характер її обтікання сонячним вітром, а також характеристики самого *сонячного вітру* (густина потоку й енергія частинок, характеристики магнітного поля) та інші малодоступні для наземних спостережень випромінювання Сонця – ультрафіолетове й рентгенівське, що є доволі цікавим для розуміння сонячно-земних зв'язків. Цінні для наукових досліджень дані надходять також і від деяких прикладних ШСЗ. Так, результати спостережень, що виконуються на метеорологічних супутниках, широко використовуються для різних геофізичних досліджень.

Орбіти таких супутників різноманітні – від майже кругових на висоті 200–300 км до втягнутих еліптичних з висотою апогею до 500 тис. км.

Результати спостережень ШСЗ дають можливість з високою точністю визначати збурення орбіт ШСЗ, зміни густини верхньої атмосфери (у зв'язку з різними проявами сонячної активності), закони циркуляції атмосфери, структуру гравітаційного поля Землі тощо.

Геофізичні супутники – це штучні супутники Землі, конструкція й наукове обладнання яких передбачають проведення досліджень геофізичних параметрів – густини атмосфери, гравітаційного, магнітного, радіаційного полів Землі тощо. На них установлюють апаратуру для вивчення характеристик полів Землі.

Вимірювання гравітаційного і магнітного полів проводилося раніше або на поверхні Землі, або в безпосередній близькості від неї за допомогою літаків. Вимірювання за допомогою ракет до висот 100–200 км були короткочасними й епізодичними. За допомогою супутників здійснюється тривале систематичне спостереження полів Землі на великій відстані від її поверхні, вивчення сили тяжіння, гравітаційних і добових магнітних варіацій, магнітних збуджень і бур та їхній зв'язок з такими процесами, як, наприклад, підвищення сонячної активності.

На ШСЗ можуть виконуватися як окремі вимірювання, так і комплексні геофізичні дослідження, що дозволяють вивчати корелювання окремих параметрів між собою. Першим ШСЗ такого типу є 3-й радянський штучний супутник Землі (запущений у 1958 р.). У 1964 р. і пізніше в США запущені серії орбітальних геофізичних обсерваторій (ОГС) і полярних орбітальних геофізичних обсерваторій (ПОГО), на яких проведені різноманітні геофізичні вимірювання, зокрема в зоні полярного сяйва й на полярних шапках.

У деяких випадках вимірювання на геофізичних супутниках здійснюються в комплексі зі спеціальною програмою спостережень на мережі наземних станцій, що дозволяє досліджувати взаємозв'язок між окремими геофізичними параметрами, а також вивчати сонячно-земні зв'язки. Прикладом такого супутника може слугувати "Космос-261" (запущений у 1968 р.), який проводив вимірювання одночасно зі спостереженнями на мережі іоносферних станцій соціалістичних країн. Особливий тип становлять геофізичні супутники, котрі виконують оперативні спостереження і мають прикладне значення (такими є метеорологічні супутники).

Вимірювання геомагнітних полів Землі, Місяця та інших планет – один із найважливіших експериментів на сучасному етапі космічних досліджень. Результати цих досліджень будуть сприяти кращому розумінню природи земного магнетизму, джерел різних його варіацій і відповідності між цими варіаціями та іншими явищами, такими як іоносферні вітри й сонячні плями. Розвиток геофізичних досліджень за допомогою ШСЗ, імовірно, приведе до створення спеціалізованих геофізичних орбітальних станцій. Геофізичні спостереження можуть включатися також до програми робіт орбітальних станцій більш широкого профілю.

До подібних супутників належать: "Космос-26, -49, -321" (СРСР), "Explorer", OGO (Орбітальна геофізична обсерваторія) (США), GRACE (США, Німеччина) та ін.

Астрономічні супутники та орбітальні астрономічні обсерваторії призначені для дослідження планет, галактик та інших космічних об'єктів. Астрономічні ШСЗ оснащуються оптичними або радіотелескопами для спостереження ЕМВ небесних тіл у різних діапазонах спектра.

Прикладом однієї з перших астрономічних обсерваторій може слугувати ШСЗ "Космос-215", запущений на низьку орбіту (216–426 км) у 1968 р. Він був оснащений вісьмома невеликими телескопами, зокрема рентгенівським. У США запускались астрономічні супутники серій SAS (малий астрономічний супутник) та OAO (орбітальна астрономічна обсерваторія). Перші забезпечувались апаратурою для дослідження рентгенівських випромінювань і гамма-променів, другі – телескопами для дослідження планет, зірок і галактик. До них належить відомий американський космічний телескоп, призначений для всебічного вивчення

Всесвіту, – Hubble Space Telescope (HST), який був виведений на орбіту Землі в 1990 р. Це найсучасніший телескоп, якому доступні зірки, що знаходяться на відстані від Землі в тринадцять мільярдів світлових років. За його допомогою вже зроблено серію сенсаційних відкриттів, зокрема стало можливим уточнити вік Всесвіту, знайти ділянки в нашій Галактиці, де є можливість існування життя, а також вивчати ймовірність зіткнення галактик.

Геодезичні супутники – це ШСЗ, що запускаються як об'єкти спостереження для виконання завдань супутникової геодезії: визначення розмірів і форми Землі, уточнення положення опорних пунктів єдиної системи координат, дослідження гравітаційного поля Землі. Матеріалами для виконання таких завдань служать виміряні в результаті спостережень напрямки на той чи інший супутник (позиційні спостереження) і відстані до нього.

Спеціально організовані позиційні й віддалемірні синхронні спостереження супутників (одночасно з декількох станцій) методами *супутникової геодезії* дозволяють здійснювати геодезичну прив'язку пунктів, віддалених на тисячі кілометрів один від одного, вивчати рух материків тощо.

Завдання супутникової геодезії виконуються шляхом проведення точних траєкторних вимірювань під час руху супутника на орбіті. Спостереження відхилень супутника від розрахованої з високою точністю орбіти дозволяють зробити висновки про наявність гравітаційних аномалій або відхилень у формі Землі.

Геодезичний зв'язок між пунктами Землі, віддаленими один від одного до декількох тисяч кілометрів (наприклад, при міжконтинентальній космічній тріангуляції), встановлюється шляхом позиційних фотографічних спостережень супутника, що рухається на висоті 3–6 тис. км одночасно з двох або більше пунктів. Для забезпечення таких спостережень супутниковими фотокамерами середніх розмірів запускаються *надувні геодезичні супутники* – балони діаметром до 30–40 м з алюмінійованої пластмасової плівки. У динамічній супутниковій геодезії використовують більш масивні супутники, рух яких менше залежить від неоднорідностей атмосфери, а визначається в основному особливостями гравітаційного поля Землі.

Для підвищення точності одночасних позиційних спостережень і вимірювання відстаней до супутників на геодезичні супутники встановлюється спеціальне обладнання. Потужні імпульсні джерела світла, робота яких контролюється бортовими кварцовими годинниками й керується з Землі, полегшують позиційні спостереження і дозволяють синхронізувати їх з високою точністю при одночасній роботі декількох станцій. Точні вимірювання миттєвого положення супутника проводяться з урахуванням допплерівського зсуву частоти бортового еталонного генератора, а також даних радіолокаційного висотоміра (з розрізненністю по висоті до 10 м) або лазерного висотоміра (з розрізненністю до 0,5 м).

Прийомо-передавачі, що ретранслюють радіосигнали, які надсилаються на геодезичні супутники наземними станціями, дозволяють шляхом вимірювання зсуву фази прийнятого на станції сигналу відносно посланого визначати відстані до супутника. Відстані до супутників визначаються також на основі аналізу змін частоти сигналів установлених на них радіопередавачів (унаслідок впливу ефекту Допплера). Для вимірювання відстаней супутниковими лазерними віддалемірами на геодезичні супутники встановлюються кутові відбивачі.

За допомогою геодезичних ШСЗ побудовано мережу глобальної космічної тріангуляції на території Північної та Південної Америки, держав Європи й Африки, Японії та низки інших держав (ШСЗ "Geos-L, -2, -3", "Lageos-3"). Після запуску геодезичих ШСЗ в результаті виконання динамічних завдань космічної геодезії вдалося з високою точністю визначити стиснення Землі, було підтверджено еліптичну форму екватора й встановлено асиметрію північної та південної півкуль.

Першим геодезичним супутником був американський супутник "Anna-1 B", запущений на орбіту в 1962 р. й обладнаний імпульсними лампами. До сучасних геодезичних супутників належать ШСЗ типів: "Geosat", "Pageos-1", GFZ-1, LAGEOS-1, -2 (США), космічний геодезичний комплекс ГЕОИК, САДКО (СРСР, Росія), Реоі (Франція) та інші.

Метеорологічні супутники призначені для регулярної передачі на наземні пункти спостереження телевізійних зображень хмарного, снігового і крижаного покривів Землі, відомостей про теплове випромінювання земної поверхні та хмар тощо. ШСЗ цього типу запускаються на орбіти, близькі до кругових, з висотою від 500–600 до 1200–1500 км: ширина смуги огляду в них досягає 2–3 тис. км.

За допомогою наукових приладів, установлених на метеорологічних ШСЗ, вивчаються нейтральний та іонний склад верхньої атмосфери, її тиск і температура, а також зміни цих параметрів. Концентрація електронів в іоносфері досліджуються як за допомогою бортової апаратури, так і за спостереженнями проходження крізь іоносферу радіосигналів бортових радіомаяків. За допомогою зондів детально вивчені структура верхньої частини іоносфери (вище голови: максимуму електронної концентрації) і зміни електронної концентрації залежно від геомагнітної широти, часу доби тощо. Усі результати досліджень атмосфери, отримані за допомогою ШСЗ, є важливим і надійним експериментальним матеріалом для розуміння механізмів атмосферних процесів і для вирішення таких практичних питань, як прогноз радіозв’язку, прогноз стану верхньої атмосфери тощо.

Біосупутники призначені для проведення наукових експериментів над живими організмами в умовах космосу.

Експериментальні супутники призначені для відпрацювання нових супутникових платформ та розробки новітніх супутникових технологій, таких як "сонячний парус", пасивний рефлектор тощо.

Гідрологічні супутники забезпечують у глобальному масштабі реєстрацію опадів та утворення водяної пари в атмосфері, а також визначення біохімічних характеристик води.

Обладнання таких супутників дозволяє контролювати сніговий і льодовий покрив планети, водні ресурси, зволоженість ґрунтів, шо має першочергове значення для сільського господарства. Обладнання супутників передбачає також збирання інформації від десятків тисяч наземних гідрологічних станцій для передачі її в центри збирання та оброблення інформації. Результати роботи гідрологічних супутників сприяють поліпшенню іригації та зменшенню збитків від паводків.

Природоресурсні супутники є надзвичайно перспективними для дослідження природних ресурсів Землі. Поряд з метеорологічними, океанографічними і гідрологічними спостереженнями такі ШСЗ дозволяють отримувати оперативну інформацію, необхідну для геології, сільського господарства, рибного промислу,

лісового господарства, контролю забруднень природного середовища тощо. Поєднання можливості безперервного огляду величезних просторів земної кулі, що реалізується орбітальними КА, з різноманітними новітніми вимірювальними та дослідницькими сенсорами, зробило космічну техніку незамінним інструментом дослідження природних ресурсів Землі з метою наукової організації та регулювання господарської діяльності людства. До таких ШСЗ належать: "Метеор-Природа" (СРСР), ERS 1,2 (Європейський супутник), "Geosat", JERS, "Landsat", SROSS (США), "Radarsat" (Канада), SPOT (Франція), "Ресурс-01-3" (Росія), 1RS (Індія), "Adeos", JERS (Японія), SCD (Бразилія).

Прикладні – це *супутники зв'язку* і *навігаційні супутники*. Супутники зв'язку та телекомунікації слугують для забезпечення ретрансляції сигналу телевізійних передач, радіотелефонного, телеграфного та інших видів зв'язку між наземними станціями, розташованими один від одного на відстані до 10–15 тис. км. Бортова радіоапаратура таких ШСЗ приймає сигнали наземних радіостанцій, підсилює їх і передає на інші наземні радіостанції. Радіолінії космічних ретрансляторів мають безпрецедентну для систем зв'язку перевагу, що полягає у величезній площі зон прямої видимості, розміри якої визначаються лише висотою орбіти КА і в граничному випадку можуть досягати майже 40 % поверхні Землі.

Застосування космічних ретрансляторів дозволяє здійснювати радіозв'язок між двома будь-якими пунктами земної кулі в будь-якому діапазоні хвиль, зокрема й на НВЧ, виключає вплив нестабільності іоносфери на якість зв'язку, допускає зниження потужності передавальних станцій. Космічні ретранслятори є сьогодні єдиним засобом суцільного телевізійного обслуговування величезних територій. Зона, в якій можливий прийом супутникового сигналу, називається *зоною покриття.* Вона визначається положенням на орбіті, орієнтацією і технічними характеристиками супутника. Застосовуючи різні модуляції, через супутник можна передавати як цифрову інформацію, так і аналогові сигнали.

Більшість супутників мають декілька передавачів – *транспондерів,* кожен з яких покриває деяку смугу частот (для С-діапазону 4 або 8 ГГц). Транспондери розрізняються поляризацією і діапазоном (С або Ки) з якими вони працюють.

Супутники зв'язку розміщуються в трьох зонах, зумовлених існуванням поясів Ван Алена: 1 зона – зона геостаціонарних супутників зв'язку, знаходиться на висоті 35886 км, для забезпечення покриття всієї території Землі потрібно лише три супутники; 2 зона – середньовисотних супутників – займає діапазон висот від 5000 до 15000 км, для покриття всієї земної поверхні потрібно близько 10 таких супутників; завершують класифікацію низькоорбітальні супутники 3 зони, яких для покриття зв'язком усієї Землі потрібно не менше п'ятдесяти.

До ШСЗ зв'язку відносяться: ШСЗ "Молния" (СРСР), "Intelsat" (США), "Brazilsat" (Бразилія), "Chinastar" (Китай), "Горизонт" (Росія) та ін.

Підвидом супутників зв'язку є телекомунікаційні або супутники прямої трансляції (DBS). Це супутники трансляції радіосигналів і телебачення безпосередньо на Землю абонентам із системами прийому сигналів на базі супутникових антен. До них належать: ШСЗ "Astra 1A, 1C, 1D", "DirecTV".

Навігаційні супутники та навігаційні супутникові системи. Особливості орбітальних КА, які полягають в тому, що зона видимості їх для наземного

спостерігача охоплює величезні площі (супутник з висотою орбіти 1000 км видно в зоні радіусом 3000 км), а положення КА в будь-якій точці на орбіті може бути прогнозовано на багато годин уперед з високою точністю. Це дозволило створити глобальну супутникову навігаційну систему, вільну від деяких недоліків існуючих регіональних радіонавігаційних і навігаційних систем – астрономічні засоби навігації неможливо використовувати в складних метеорологічних умовах, а інерціальні системи навігації потребують періодичного коригування їхніх показань за даними інших систем.

Глобальна навігаційна система з використанням супутників забезпечує можливість найрізноманітнішим користувачам, що знаходяться в будь-якій точці земної кулі, в будь-яких метеорологічних умовах, у будь-який сезон року й час доби визначати своє місце розташування з високою точністю. Похибка визначення координат, при використанні на літаку або кораблі найпростішого обладнання, становить ±200 м і менше, при оброблянні даних спостереження супутником і отриманої від нього інформації в обчислювальній машині похибка зменшується до ±15–30 м.

Застосування системи дозволяє літакам і кораблям вибирати раціональні маршрути проходження, скорочує витрати на пошуково-рятувальні роботи, сприяє безпеці навігації, дозволяє точно визначати місця скупчення риби тощо.

Крім навігаційних завдань, супутники несуть диспетчерську службу, яка полягає в отриманні від кораблів і літаків даних про їхнє розташування і передачі цих даних на станції збору інформації.

До таких систем відносяться діючі навігаційні системи:

– глобальна навігаційна система позиціювання на основі тимчасових і віддалемірних вимірів Global Positioning System Navigation Satellite with Time And Ranging, скорочена назва GPS-Navstar (США);

– глобальна навігаційна супутникова система ГЛОНАСС (Росія);

– "Galileo" – європейський проєкт супутникової системи навігації з участю в проєкті Китаю, Ізраїлю, Південної Кореї, України та Росії;

– "Бейдоу", або "Compass" (з кит. *beidou,* буквально – Північний Ковш (китайська назва сузір'я Великої Ведмедиці);

– індійська регіональна навігаційна супутникова система Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) та низка інших.

10.2. Характеристики орбіт космічних літальних апаратів

10.2.1. Загальні відомості про умови польоту космічних апаратів

При плануванні будь-якого космічного польоту потрібно обрати оптимальну траєкторію, яка дозволила б при прольоті небесного тіла, його обльоті або при виході на орбіту його супутника отримати максимальну інформацію, необхідну для виконання різноманітних науково-технічних робіт.

Траєкторія руху штучного супутника Землі (ШСЗ) називається його орбітою.

Під час вільного польоту супутника, коли його бортові реактивні двигуни вимкнені, рух відбувається під впливом гравітаційних сил і за інерцією, причому головною силою є тяжіння Землі.

Якщо вважати Землю строго сферичною, а дію гравітаційного поля Землі – єдиною силою, що впливає на супутник, то рух ШСЗ відбувається по так званих *кеплерівських орбітах,* які відповідають математичним лініям: *прямій, колу, еліпсу, параболі, гіперболі.* Рух по прямій можливий або з нескінченно великою швидкістю, або за умови, що вектор швидкості проходить через центр тяжіння.

Переміщення ж космічного апарата (КА) відбувається в нерухомій (у абсолютному просторі) площині, яка проходить через центр Землі, – *площині орбіти.* До елементів, які характеризують положення орбіти в просторі, відносять її *форму, нахил до площини екватора, розмір або висоту* та *період обертання.*

Якщо вважати Землю строго сферичною з рівномірним розподілом маси всередині неї, а дію гравітаційного поля Землі − єдиною силою, що діє на супутник, то маємо так звану задачу Кеплера, яка зводиться до розв'язання рівняння:

$$md^2r/dt^2 = -\gamma mMr/r^3, \qquad (10.1)$$

де m − маса супутника;

$M = 5{,}986 \cdot 10^{28}$ г − маса Землі;

r – радіус-вектор, що з'єднує супутник і центр Землі.

Розв'язок рівняння в полярних координатах r, ν дається співвідношенням:

$$r = \frac{p}{(1 + e\cos\nu)}. \qquad (10.2)$$

Це рівняння кривої другого порядку − еліпса (або кола − окремого випадку еліпса). Еліптичну орбіту зображено на рис. 10.2, де в точці S знаходиться супутник, у точці G − Земля, $a = AO$ і $b = OC$ – велика і мала півосі еліпса; $e = (1 - b^2/a^2)^{1/2}$ − ексцентриситет орбіти; кут ΠGS − кутова координата ν радіуса-вектора r (так звані істинна аномалія); фокальний параметр $p = b^2/a = K^2/\gamma m^2 M$, де K − момент кількості руху супутника. Орбіта супутника характеризується також періодом обертання Т − часом між двома послідовними проходженнями однієї і тієї ж точки орбіти.

В рамках задачі Кеплера супутник рухається в площині, що проходить через центр Землі, − площині орбіти. В так званій *абсолютній* або *зірковій* системі координат площина орбіти нерухома.

Абсолютна система − це декартова система координат з початком у центрі Землі, нерухома відносно зірок.

Вісь Z спрямована вздовж осі обертання Землі і вказує на північ, вісь X спрямована на точку весняного рівнодення, а вісь Y перпендикулярна осям X і Y. Точка весняного рівнодення − це та точка на небесній сфері, в якій знаходиться Сонце 21 березня о 0:00 годині за всесвітнім часом. Площина орбіти перетинається в загальному випадку з площиною екватора Землі, лінія перетинання називається

лінією вузлів. Точка, в якій орбіта перетинає площину екватора під час руху супутника з півдня на північ, називається висхідним вузлом *B* орбіти, точка перетинання під час руху супутника з півночі на південь – низхідним вузлом *H*.

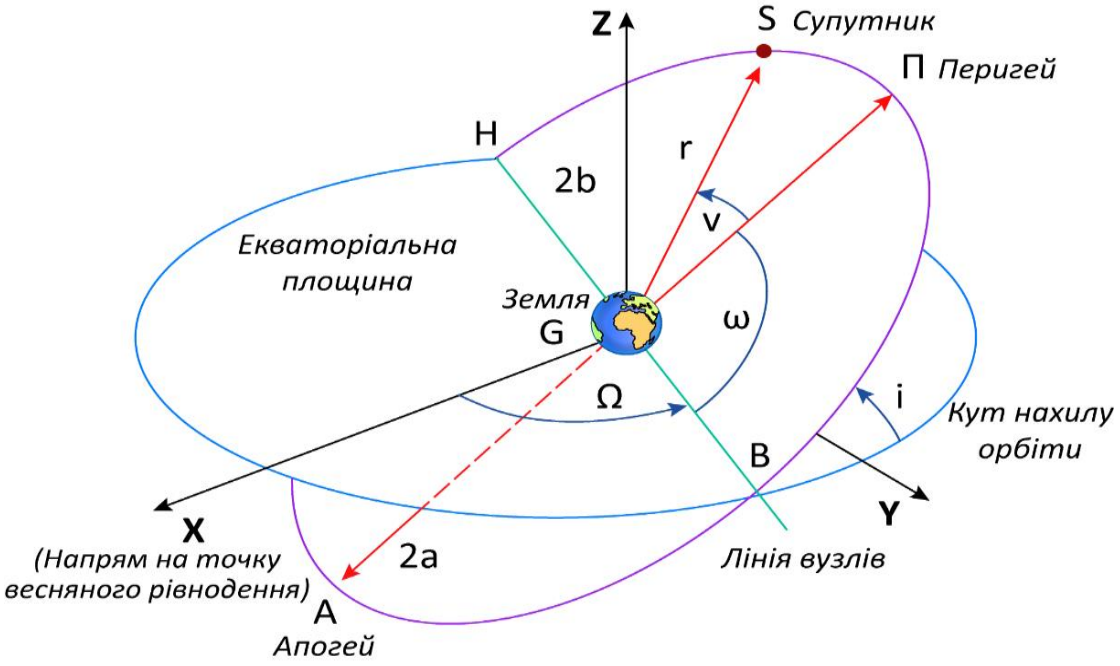


Рис. 10.2. *Еліптична орбіта*

Положення висхідного вузла визначається довготою висхідного вузла, тобто кутом Ω між висхідним вузлом і точкою весняного рівнодення, що відраховується проти годинникової стрілки, якщо дивитись з боку Північного полюса. Відносно лінії вузлів задають два кути в площині орбіти.

Кут ω – кутова відстань, що рахується від висхідного вузла в площині орбіти до перигею орбіти П, тобто найближчої до Землі точки орбіти супутника; ω називають аргументом перигею. Кут i між площиною орбіти і площиною екватора називається нахилом орбіти. Кут i рахується від площини екватора, зі східного боку висхідного вузла орбіти, проти руху годинникової стрілки. За нахилом розрізняють *екваторіальні* ($i = 0°$), полярні ($i = 90°$) і нахилені орбіти ($0 < i < 90°$, $90 < i < 180°$).

Довгота висхідного вузла Ω, нахил, аргумент перигею ω характеризують положення площини орбіти і її орієнтацію в просторі. Форму і розмір орбіти задають фокальний параметр p і ексцентриситет e. Для прив'язки руху супутника до часу до числа елементів уводиться час проходження супутником точки початку, відліку t_0. Сукупність параметрів Ω, ω, i, p, e, t_0 називається *кеплерівськими елементами*, елементами орбіти.

Знаючи параметри Ω, ω, i, p, e і положення супутника на орбіті в момент t_0, можна знайти це положення в будь-який інший момент часу t_1.

Нехай дано еліптичну орбіту супутника, що рухається навколо Землі *G*. Проведемо з центра цієї орбіти О коло радіусом, який дорівнює великій піввісі еліпса (рис. 10.3).

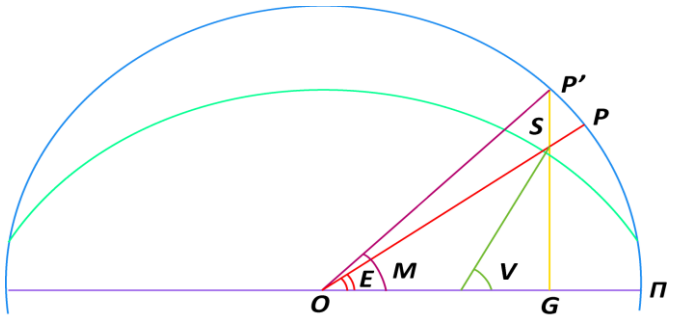


Рис. 10.3. *Ілюстрація обчислення положення супутника*

Нехай у момент t_n супутник перебував у перигелії орбіти *П*, а через певний час у момент t_0 змістився в точку *S*. Кут ПGS (між напрямком на перигелій і радіусом-вектором), як зазначалось, називається істинною аномалією ν в момент t_0. Проведемо через *S* пряму, перпендикулярну до осі *ОП* і яка перетинається в точці *P* з колом. Кут *ПОР* називається ексцентричною аномалією *E* в момент t_0.

Уявімо тепер точку, яка виходить з перигелію одночасно з супутником і рухається по колу рівномірно зі швидкістю, яка дорівнює середній швидкості руху супутника по орбіті. Ця середня швидкість називається середнім рухом і дорівнює:

$$n = 360°/T,$$

де *T* – період обертання.

Якщо в момент t_0 така точка займе положення *P'*, то кут *ПОР'* буде дорівнювати $M = n(t_0 - t_n)$. Ця величина називається середньою аномалією в момент t_0. Розв'язуючи трансцендентне рівняння

$$E - e \sin E = M,$$

яке називається рівнянням Кеплера, можна знайти ексцентричну аномалію *E*.

Істинна аномалія ν, що характеризує положення супутника на орбіті в абсолютній системі координат в момент t_0, пов'язана з *E* і ексцентриситетом *e* співвідношенням:

$$tg\ \nu/2 = [(1 + e)/(1 - e)]^{1/2}\ tg\ E/2.$$

Знаючи середній рух *n* та істинну аномалію ν в момент t_0, можна обчислити t_n і далі істинну аномалію ν в момент t_1, тобто визначити положення супутника на орбіті.

Однак розв'язок задачі Кеплера дає лише наближений опис орбіти супутника. По-перше, маси всередині Землі розподілені нерівномірно, оскільки полярний радіус Землі менший від екваторіального радіусу. По-друге, на рух супутника впливає опір земної атмосфери. По-третє, необхідне урахування світлового тиску сонячних променів. По-четверте, потрібно враховувати тяжіння Місяця і Сонця тощо. Вплив цих факторів на рух ШСЗ незначний порівняно з силою тяжіння Землі. Вони мають назву збуджувальних сил, а рух супутника з урахуванням їх впливу – збуреним рухом. Основним джерелом збурення є перший фактор. Якщо враховувати тільки першу зональну гармоніку в розкладанні гравітаційного потенціалу Землі (вона описує стиснення Землі з полюсів), то виявляється, що головним

чином змінюється орієнтація орбіти в просторі, а форма і розміри орбіти залишаються постійними.

За один оберт довгота висхідного вузла Ω і аргумент перигею ω змінюються на:

$$\Delta\Omega = -0^{\circ},58\,(R_0/a)^2\cos^2 i/(1-e^2)^2,$$

$$\Delta\omega = 0^{\circ},29\,(R_0/a)^2\,(5\cos^2 i-1)/(1-e^2)^2,$$

де R_0 = 6 388,14 км − екваторіальний радіус.

Ці вирази дають у першому наближенні поправки до довготи висхідного вузла Ω і аргументу перигею ω і дозволяють уточнити положення орбіти в абсолютній системі координат.

Супутник, що рухається в земній атмосфері, зазнає аеродинамічного гальмування, яке залежить від щільності атмосфери на висоті польоту, від швидкості супутника, площі його поперечного перетину і маси. Збурення орбіти за рахунок аеродинамічного гальмування містить регулярну і нерегулярну складові. Регулярні збурення спричиняє добовий ефект (вночі, тобто в конусі земної тіні, щільність атмосфери на даній висоті менша, ніж вдень). Рух повітряних мас, вплив потоків заряджених частинок, що викидаються Сонцем, призводять до нерегулярних збурень. Для природознавчих супутників опір атмосфери відіграє помітну роль тільки при низьких орбітах; при висоті перигею більше 500−600 км збурювальне прискорення від нерівномірності розподілу мас перевищує на 2 порядки і більше прискорення від гальмування в атмосфері.

При висоті перигею від 500−600 до декількох тисяч кілометрів до основного фактора збурення додається тиск сонячного світла. Вплив тиску сонячних променів проявляється в появі додаткових малих періодичних збурень елементів орбіти. Якщо ж супутник рухається так, що регулярно потрапляє в конус земної тіні, то мають місце також і невеличкі постійні зміни елементів. Однак величина прискорення за рахунок тиску світла у декілька порядків менша, ніж збурювальне прискорення за рахунок основного фактора. Ще менший вплив тяжіння Місяця і Сонця.

Існують моделі руху супутників по орбіті, що враховують усі основні сили збурення. Вони дозволяють з високою точністю прогнозувати значення орбітальних елементів на багато місяців уперед.

Однак на практиці найчастіше застосовуються орбітальні елементи в форматі NORAD (США) з мережі інтернет (http://www.celestrak.com). За цією адресою представлені орбітальні елементи для супутників будь-якого призначення, що були запущені в різний час в різних країнах, зокрема архівні матеріали.

Формат NORAD використовує доволі прості моделі руху супутників, проте орбітальні елементи постійно корегуються за даними мережі радіолокаційних станцій і станцій оптичного спостереження (для низьколітальних супутників корегування може відбуватись декілька разів на добу).

Перевагою елементів NORAD є їх доступність, однак ці орбітальні елементи порівняно швидко застарівають. Зокрема, якщо при розрахунку орбіти супутника NOAA використовувати елементи NORAD тижневої давнини, то виявляється, що

підсупутникова точка може зміститись на декілька кілометрів відносно її істинного положення. Знаючи орбітальні елементи, можна передбачати час проходження супутника над тим чи іншим районом, спрямувати антену приймальної станції на супутник, здійснювати геоприв'язку зображень, отриманих за допомогою супутника.

Супутники для ДЗЗ переважно запускають на кругові орбіти. Мале значення ексцентриситету орбіти супутника NOAA-18, що дорівнює $e = 1{,}0008831$, є доволі типовим. Такий супутник пролітає над різними ділянками Землі на однаковій висоті, що забезпечує однаковість умов зйомки. Справедливим є вираз:

$$mV^2/R = mM\gamma/R^2,$$

де V – швидкість супутника на орбіті;
$R = R_0 + H$ – відстань між супутником і центром Землі, причому $R_0 = 6380$ км – середній радіус Землі;
H – висота супутника над поверхнею Землі;
$\gamma = 6{,}68 \cdot 10^{-14}$ м^3/г·с^2 – гравітаційна постійна.

Ліворуч стоїть відцентрова сила, праворуч – сила тяжіння супутника до Землі. Таким чином, $V = (M\gamma/R)^{1/2}$, період обертання супутника дорівнює $T = 2\pi R/V$.

Позначимо $B = (M\gamma)^{1/2} = 6{,}31 \cdot 10^2$ км $^{3/2}$/с. Тоді $V = B/R^{1/2}$, $T = 2\pi R^{3/2}/B$.

Швидкість переміщення підспутникової точки по поверхні Землі $V_З$ може бути визначена за формулою $V_З = V \cdot R_0/R$.

Нехай $H = 1000$ км, тоді $R = 8380$ км. Використовуючи наведені формули, знаходимо, що швидкість на орбіті $V = 8{,}35$ км/с, $V_З = 6{,}35$ км/с, період обертання T = 0,5 хв.

Низькоорбітальні супутники (H менше 1 000 км) зазвичай виводяться на приполярні сонячно-синхронні орбіти. Ці орбіти мають нахил i, близький до 90°, забезпечують зйомку всієї поверхні Землі, включаючи полярні зони. Поворот орбіти відносно Землі синхронізований з обертанням Землі відносно Сонця таким чином, що протягом усього часу кут між площиною орбіти і напрямком до Сонця є постійним (рис. 10.4).

Це дозволяє виконувати зйомку приблизно в одну і ту ж годину місцевого часу протягом усього року. Найзручнішим часом для зйомки є час близько місцевого опівдня. Супутник NOAA-18 має орбіту з нахилом 98,86°, так що за добу площина орбіти повертається відносно Землі на 0,986°, за рік – на 360°.

Однак через збурення, викликані нерівномірністю розподілу мас Землі, опором атмосфери, тиском сонячних променів тощо, протягом декількох років площина орбіти декілька разів змінюється.

Деякі метеорологічні супутники запускають на геостаціонарну орбіту заввишки 36 тис. км з періодом 24 год. Ці супутники знаходяться над однією й тією ж точкою на екваторі і забезпечують постійний огляд однієї й тієї ж частини планети на широтах від 50º пн. ш. до 50º пд. ш.

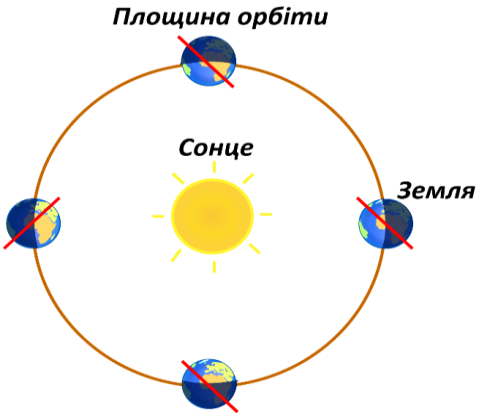


Рис. 10.4. *Сонячно-синхронна орбіта*

10.2.2. Орбіти польоту космічних апаратів та їх характеристики

Орбіти польоту космічних літальних апаратів безпосередньо впливають на якість супутникових знімків, що слугують матеріалом для картографування. З цієї точки зору становлять певний інтерес наступні параметри орбіт:

– форма;
– нахил;
– висота;
– період обертання;
– положення по відношенню до Сонця.

Форма орбіт супутників обумовлюється законами небесної механіки, залежно від швидкості руху космічного апарату може бути *коловою*, *еліптичною*, *параболічною* або *гіперболічною* (рис. 10.5, 10.6).

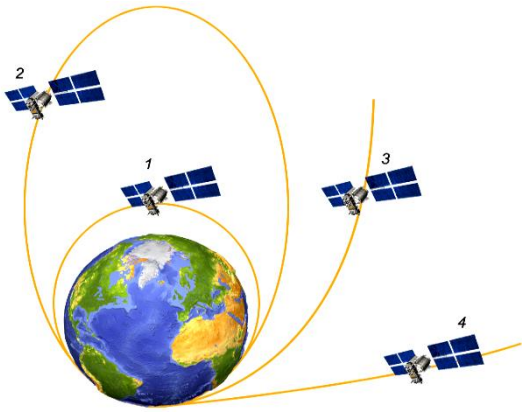


Рис. 10.5. *Орбіти супутників: 1– колова; 2 – еліптична; 3 – параболічна; 4 – гіперболічна*

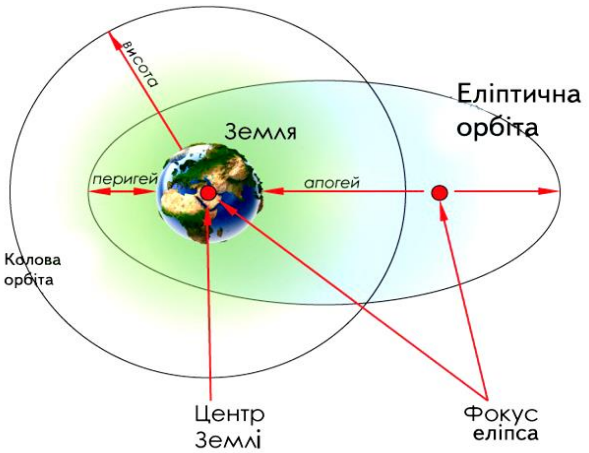


Рис. 10.6. *Колова й еліптична орбіти*

Незамкнені параболічні і гіперболічні орбіти використовуються для виведення космічних апаратів до інших планет, а спостереження Землі зазвичай здійснюється з замкнених колових і еліптичних орбіт.

Еліптична орбіта (рис. 10.7) є траєкторією супутника планети, яка розташовується в одному з фокусів еліпса. Точка орбіти, найближча до центра планети, називається *перицентром* (π), а найбільш віддалена – *апоцентром* (A).

З метою вказівки небесного тіла, навколо якого літає КА, замість слова "центр" ставлять назву цього тіла. Наприклад, для Землі *перигей*, *апогей*; для Місяця періселеній, апоселеній тощо.

Перигей (грец. – *περίγειος, букв. "навколоземний"*) **– *найближча до Землі точка навколоземної орбіти небесного тіла або штучного супутника Землі.***

Апогей (від грец. *απόγεια, букв. "від землі"*) **– *точка навколоземної орбіти небесного тіла або штучного супутника Землі, найбільш віддалена від центра Землі.***

Для дистанційної зйомки найкращими є колові орбіти або наближені до них, висоти яких в перигеї й апогеї є близькими (рис. 10.8).

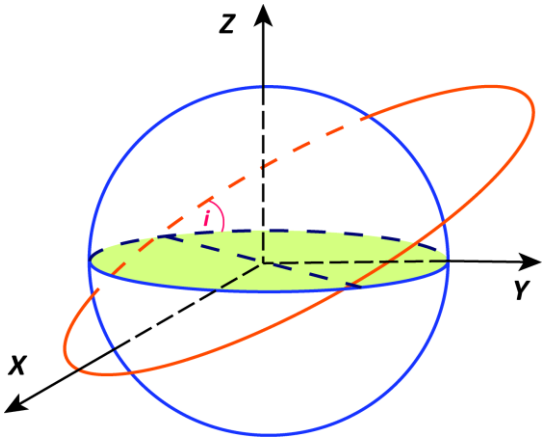


Рис. 10.7. *Нахилена еліптична орбіта*

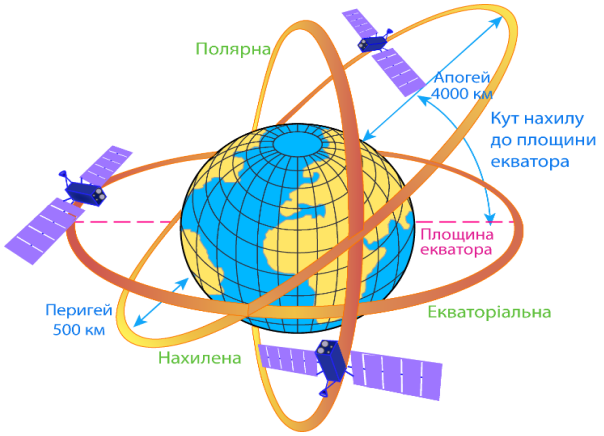


Рис. 10.8. *Апогей і перигей еліптичної орбіти*

Колова орбіта забезпечує однакову висоту зйомки земної поверхні, а отже, для однієї й тієї ж апаратури – однакове охоплення і розрізнення знімків.

Аналіз цільових завдань ДЗЗ свідчить про доцільність використання КА колових орбіт, оскільки:

– колові орбіти порівняно з еліптичними висувають суттєво менші вимоги до динамічного діапазону приймально-підсилювальних трактів апаратури, оскільки внаслідок постійної висоти орбіти зміна дальності радіозв’язку не залежить від географічного положення пункту прийому;

– колові орбіти забезпечують постійність радіусу зони обслуговування на поверхні Землі і рівномірне її покриття смугами радіовидимості.

Крім колових орбіт, за якими зазвичай літають метеорологічні супутники, пілотовані космічні апарати й орбітальні станції, для постійного спостереження за глобальними процесами на Землі використовуються еліптичні орбіти з великою різницею висот в апогеї і перигеї.

Еліптичні орбіти (особливо з великим ексцентриситетом) мають нижчу стабільність через різницю атмосферного гальмування в перигеї й апогеї. В умовах

дії збурень за наявності похибок у процесі виведення та управління стабільність взаємної орієнтації орбіт і сфазованість КА легше забезпечити для колових орбіт.

За відношенням до Сонця або Землі виділяють два види орбіт – *геосинхронні* і *геліосинхронні*. На цих орбітах працюють супутники зв'язку, метео- і телевізійні, природо-ресурсні супутники. Це спричинено тим, що, наприклад, для систем зв'язку й мовлення потрібно, щоб видимість між супутником і відповідними наземними станціями була прямою протягом сеансу зв'язку достатньої тривалості. При неможливості забезпечити цілодобового сеансу потрібно, щоб він повторювався щодоби в один і той же час. Тому найкращими є синхронні орбіти з періодом обертання, який дорівнює або є кратним часу обертання Землі навколо осі, тобто зоряній добі – 23 години 56 хвилин 4,09 секунди. Така орбіта отримала назву геостаціонарної або геосинхронної (рис. 10.9).

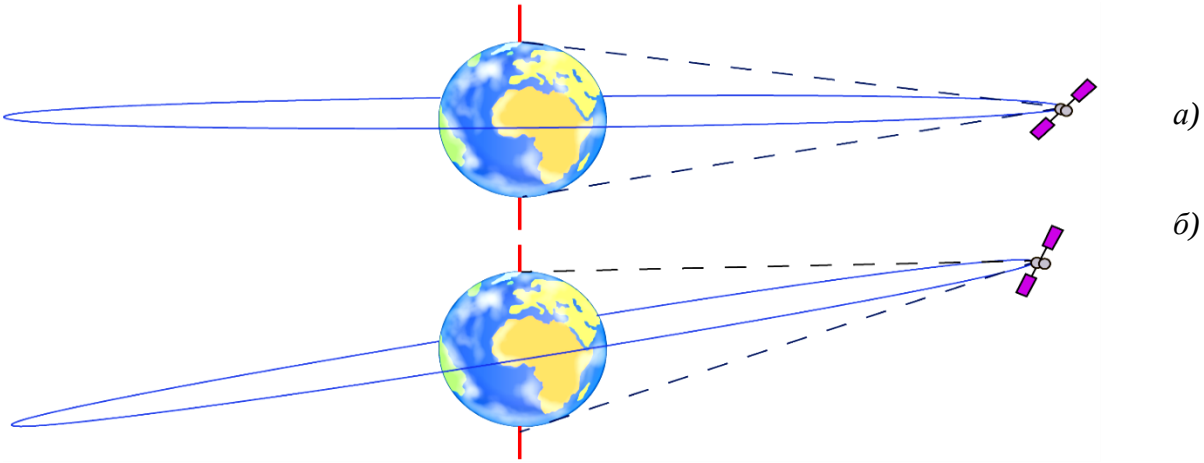


Рис. 10.9. *Орбіти ШСЗ: а) геостаціонарна; б) геосинхронна*

Геосинхронна орбіта – орбіта навколо Землі, для якої період обертання супутника дорівнює зоряному періоду обертання Землі – 23 год. 56 хв. 4,09 с.

Якщо така орбіта колова і лежить у площині земного екватора, то супутник у небі практично нерухомий (для земного спостерігача) і у цьому випадку його орбіта називається *геостаціонарною*. По такій орбіті супутник рухається з кутовою швидкістю, яка дорівнює швидкості обертання Землі, зависаючи над певним районом. Система з п'яти геостаціонарів забезпечує постійне спостереження всієї поверхні Землі.

Геостаціонарна орбіта має радіус 42 164 км з центром, що збігається з центром Землі, що відповідає висоті над рівнем моря 35 886 км. Якщо орбіта має відмінний від нуля нахил і нульовий ексцентриситет, то при спостереженні із Землі супутник протягом доби описує на небі вісімку. Якщо ж нахил і ексцентриситет відмінні від нуля, то вісімка може, залежно від конкретних величин нахилу та ексцентриситету, перетворитися на еліпс.

Зазвичай супутник на навколоземній орбіті робить один оберт навколо Землі приблизно за 1,5 години (період обертання), здійснюючи близько 16 витків за добу. При цьому підспутникові траси (проєкції орбіт на поверхню Землі) знаходяться одна від одної на кутовій відстані 22,5°, що становить на екваторі 2500 км.

Таким чином, для щоденного покриття зйомкою земної поверхні потрібно, щоб охоплення знімків було не менше 2500 км.

Для забезпечення виконання детальної зйомки охоплення повинно бути набагато меншим, тому для заповнення міжвиткового простору необхідна орбіта з невеличким добовим зміщенням, яка б забезпечувала прилягання або невеличке перекриття знімків з сусідніх витків (квазіперіодична орбіта).

Геостаціонарні орбіти є дуже популярними. Як приклад на рис. 10.10 наведено дані (станом на середину 2010 р.) кількісного розподілу комерційних геостаціонарних супутників залежно від довготи, отримані корпорацією Boeing [55].

Геліосинхронні (сонячно-синхронні) орбіти характеризуються тим, що космічний апарат проходить над певними ділянками земної поверхні в один і той же місцевий час, що використовується при здійсненні багаторазових зйомок за однакових умов освітлення.

Тобто на такій орбіті повторна зйомка одного й того ж району виконується при однаковій висоті Сонця. Наприклад, супутник LandSat-8, що перебуває на сонячно-синхронній орбіті, може перетинати щодня екватор п’ятнадцять разів, кожного разу о 10:00 за місцевим часом.

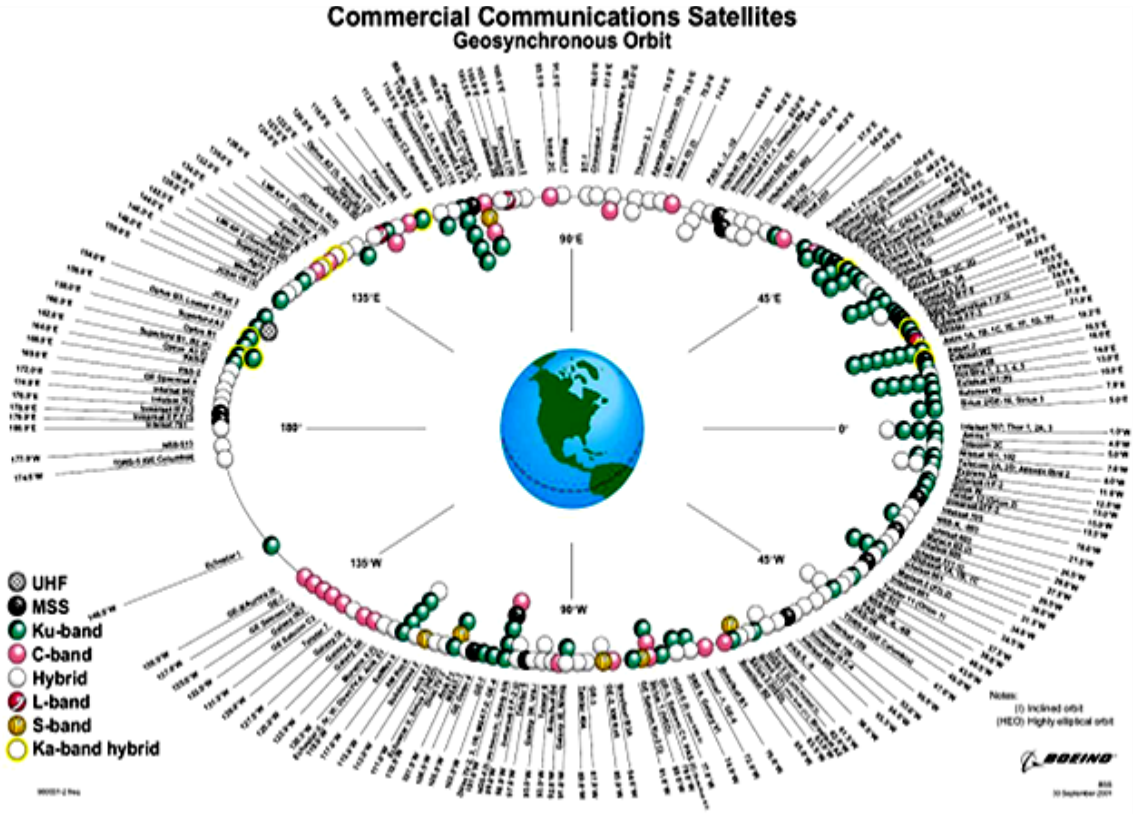


Рис. 10.10. *Комерційні телекомунікаційні супутники на геостаціонарних орбітах за даними корпорації Boeing станом на 30 червня 2010 р.*

Геліосинхронні орбіти – орбіти, при зйомці з яких сонячна освітленість земної поверхні (висота Сонця) залишається практично незмінною доволі тривалий час (майже протягом сезону). Це досягається наступним чином. Оскільки площина будь-якої орбіти під впливом несферичності (рис. 10.11) Землі трохи

повертається (прецесує), то з'являється можливість, підбираючи певне співвідношення нахилу і висоти орбіти, спромогтись, щоб величина прецесії дорівнювала добовому повороту Землі навколо Сонця, тобто близько 1° за добу.

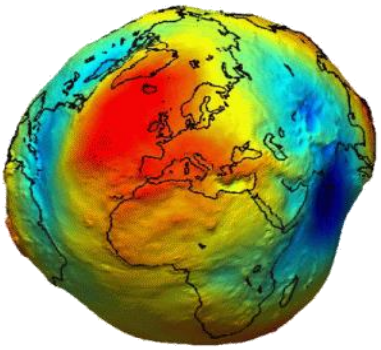


Рис. 10.11. *Форма земного геоїда за даними ШСЗ "GOCE"*

Очевидно, що для тривалих навколоземних спостережень, наприклад з ресурсних супутників, доцільно використовувати навколоколові субполярні квазіперіодичні сонячно-синхронні орбіти.

Серед навколоземних орбіт вдається створити лише декілька сонячно-синхронних, нахил яких завжди обернений. Наприклад, при висоті орбіти 1000 км нахил повинен бути 99°.

Зйомка з геліосинхронних орбіт може широко використовуватися для вивчення динаміки сучасних геологічних процесів.

За висотою виділять три групи найбільш часто використовуваних орбіт – з висотами 100–500, 500–2000 і 36000–40000 км (рис. 10.12) [78].

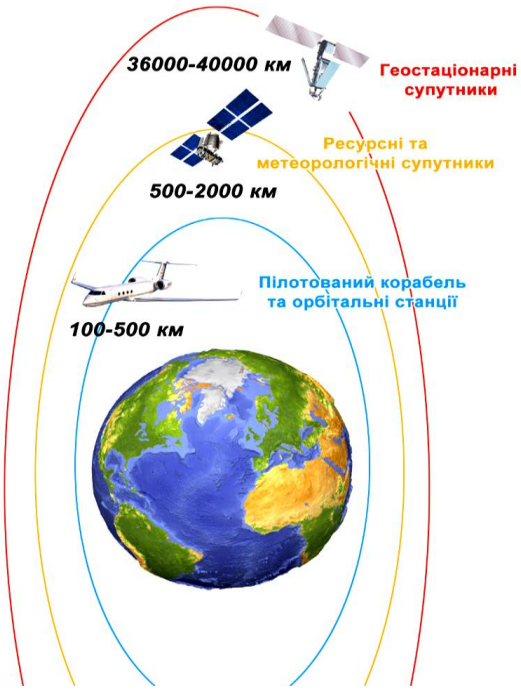


Рис. 10.12. *Класифікація платформ для віддалених систем спостереження з вказівкою типової висоти над поверхнею Землі*

Перша – це орбіти пілотованих кораблів і орбітальних станцій, для них найбільш характерними є висоти 200–400 км. Друга включає орбіти ресурсних і метеорологічних супутників; для ресурсних супутників характерні висоти 600–900 км, для метеорологічних 900–1400 км. Третя група – це орбіти геостаціонарних супутників.

Таким чином, орбіти супутників різної висоти забезпечують виконання різних знімальних завдань: низькі навколоземні орбіти використовуються для детальної фотографічної зйомки, орбіти середньої висоти – для оперативної менш детальної зйомки і віддалені геостаціонарні орбіти – для постійного спостереження за певним районом.

10.2.3. Висоти польоту космічних апаратів

Вибір висоти польоту космічних апаратів ґрунтується вимогами масштабу, смуги охоплення і просторової розрізненності. Особливо ретельно висота обирається для імпульсних систем, наприклад систем лазерного профілювання, оскільки від висоти залежить величина невизначеності за дальністю.

Верхня межа висот орбіт КА обирається з урахуванням:

– обмежень на енергетику радіоліній "КА – абонент", "абонент – КА" та "КА – КА";

– енергетичних можливостей ракетоносіїв і масо-габаритних характеристик КА;

– розташування радіаційних поясів у навколоземному просторі.

Якщо, виходячи з енергетичних характеристик радіолінії "КА – КА", визначена максимально можлива дальність зв'язку між КА мережі $D_{i\ max}$ і ставиться умова можливості забезпечення зв'язку між всіма КА, що знаходяться в зоні взаємної видимості (що необхідне для забезпечення максимальної зв'язності мережі), то відповідно до [78; 45]:

$$H_{\max} = \sqrt{\frac{D_{1\max}^2}{4} + (R_Z + h_{ATM})^2} - R_Z ,$$

де R_Z = 6 371 км – середній радіус Землі;

h_{ATM} ≈ 100 км – висота атмосферного шару, в якому відбувається найбільш сильне затухання радіовипромінювання.

Обмеження на енергетику радіолінії "КА – абонент" також звужують діапазон можливих висот орбіт [86]:

$$H_{\max} = \sqrt{D_{2\max}^2 + R_Z + D_{2\max}^2 \cdot R_Z \cdot \sin\delta_{\min}} - R_Z ,$$

де $\delta_{\min}$ – мінімальний кут піднесення КА над горизонтом, при якому можливий радіозв'язок.

При виборі нижньої межі допустимих висот потрібно враховувати, що при зменшенні висоти орбіти:

– зменшується час функціонування КА (при Н > 500 км);

– зростає кількість КА, потрібних для забезпечення глобального покриття поверхні Землі заданої кратності (або для забезпечення часу очікування зв'язку не більше заданого);

– збільшується дія сил збурення, тобто ускладняється підтримка заданої балістичної структури мережі КА;

– зменшується тривалість сеансів зв'язку "КА – абонент", що визначається при коловій орбіті співвідношеннями [86; 2]:

$$\Delta t_{св} \approx \frac{T}{\pi} \cdot \arccos \frac{\cos \varphi_З}{\cos \nu}, \; \mathrm{T} = 2\pi \times \sqrt{\frac{a_З}{\mu_0}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(R_Z + H)^3}{\mu_0}};$$

$$\varphi_З = \arccos\left(\frac{\mathrm{R_z} \cdot \cos\delta}{\mathrm{R_z} + \mathrm{H}}\right) - \delta; \; \nu = \arccos\left(\frac{\mathrm{R_z} \cdot \cos \mathrm{h_k}}{\mathrm{R_z} + \mathrm{H}}\right) - \mathrm{h_k},$$

де T – період обертання КА;

μ_0 – гравітаційна стала Землі;

$\varphi_З$ – граничний центральний кут зони обслуговування;

ν – кутова відстань від абонента до траси К

h_k – кутова висота кульмінації КА над горизонтом.

Тоді

$$\Delta \mathrm{t_{св}} = 2 \times \sqrt{\frac{(\mathrm{R_z} + \mathrm{H})^3}{\mu_0}} \cdot \arccos\left\{\frac{\cos\left[\arccos\left(\frac{\mathrm{R_z} \cdot \cos\delta}{\mathrm{R_z} + \mathrm{H}}\right) - \delta\right]}{\cos\left[\arccos\left(\frac{\mathrm{R_z} \cdot \cos \mathrm{h_k}}{\mathrm{R_z} + \mathrm{H}}\right) - h_k\right]}\right\}.$$

Значення δ_{min} вибирається залежно від характеристик спрямованості антенних пристроїв абонентів і умов розповсюдження радіохвиль в обраному діапазоні. Величина h_{kmin} визначає кутовий розмір зони обслуговування і суттєво впливає на число КА в мережі.

Таким чином, якщо для реалізації функцій і всіх режимів роботи космічних систем ДЗЗ необхідна тривалість сеансу зв'язку не менше t_{min}, то нижня межа допустимих висот орбіт H_{min} може бути визначена за допомогою наведених вище формул.

10.2.4. Період обертання космічних апаратів ДЗЗ

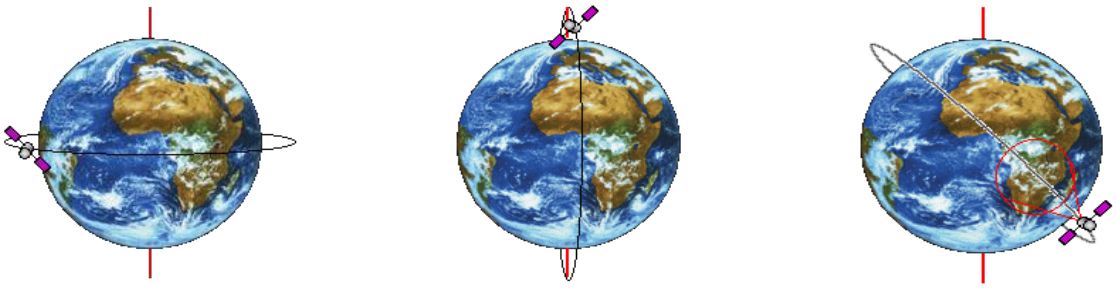
Період обертання *T* – час обертання супутника навколо Землі (інтервал часу між двома послідовними проходженнями однієї і тієї ж точки орбіти) – також становить інтерес з точки зору зйомки, оскільки від нього залежить кількість витків за добу і відповідно міжвиткова відстань, яка визначає можливість перекриття знімків сусідніх трас.

Зазвичай супутники на навколоземних орбітах при швидкості 11 км/с мають період обертання приблизно 1,5 год, здійснюючи за добу близько 16 витків навколо Землі; міжвиткова відстань при цьому складає приблизно 22,5°, що на екваторі відповідає 2500 км. З огляду на те, що охоплення знімків для більшості видів апаратури істотно менше (для фотографічної апаратури, наприклад, 80–200 км), така зйомка без розривів з сусідніх витків за одну добу неможлива. Якщо траси щодоби повторюються (такі орбіти називають добовими періодичними, що буває при періоді обертання, кратному 24 год), то і розриви в зйомці будуть зберігатися. Тому для зйомки розраховують орбіти таким чином, щоб невеликий добовий зсув трас забезпечував зйомку в наступні доби без розривів і навіть з деяким перекриттям. Це можливо на так званих квазіперіодичних орбітах з визначеним добовим зсувом траси супутника на ширину зони охоплення зйомкою з урахуванням необхідного перекриття смуг огляду.

10.2.5. Нахил орбіт космічних апаратів ДЗЗ

Нахил орбіти космічних апаратів ДЗЗ визначається кутом нахилу орбіти *i* між площиною орбіти та площиною екватора. Орбіти розділяють на (рис. 10.13, 10.14):

– екваторіальні ($i \approx 0°$);
– приекваторіальні ($0^o < i < 30^o$);
– полярні ($i \approx 90°$);
– субполярні $80^o < i < 100^o$);
– нахилені ($30^o < i < 80^o$);
– зворотні ($100^o < i < 150^o$).



а) екваторіальна орбіта *б) полярна орбіта* *в) нахилена орбіта* $30° < i < 80°$

Рис. 10.13. *Типи орбіт за нахилом*

Нахил плоскості орбіт вибирається залежно від вимог до глобальності обслуговування; висоти орбіт і ширини зон обслуговування, а також з урахуванням

географічного положення полігонів запуску. Для забезпечення глобального покриття земної поверхні повинна виконуватися умова:

$$90° - \varphi_З \le i \le 90° + \varphi_З,$$

де $\varphi_З = \arccos\left(\frac{R_Z \times \cos(\delta)}{R_Z + H}\right) - \delta = 90° - \gamma - \arccos\left(\frac{(R_Z + H)}{R_Z} \times \sin(\gamma)\right)$:

γ – ширина діаграми спрямованості бортової апаратури супутника.

При запуску ШСЗ на *полярні* (або квазіполярні) орбіти бортова апаратура використовується для дослідження всієї земної поверхні. При кутах нахилу орбіт до 50–60° приполярні області не потрапляють у поле зору бортової апаратури. При польоті ШСЗ по екваторіальній орбіті скорочується смуга площі, що підлягає зйомці.

В реальних умовах через особливості гравітаційного поля Землі строго полярних і екваторіальних орбіт (як і строго колових) не існує, і під ними розуміють *приполярні* і *приекваторіальні* орбіти.

До нахилених орбіт входять прямі (*30° < i < 80°*) і зворотні (*100° < i < 150°*) (рис. 10.14).

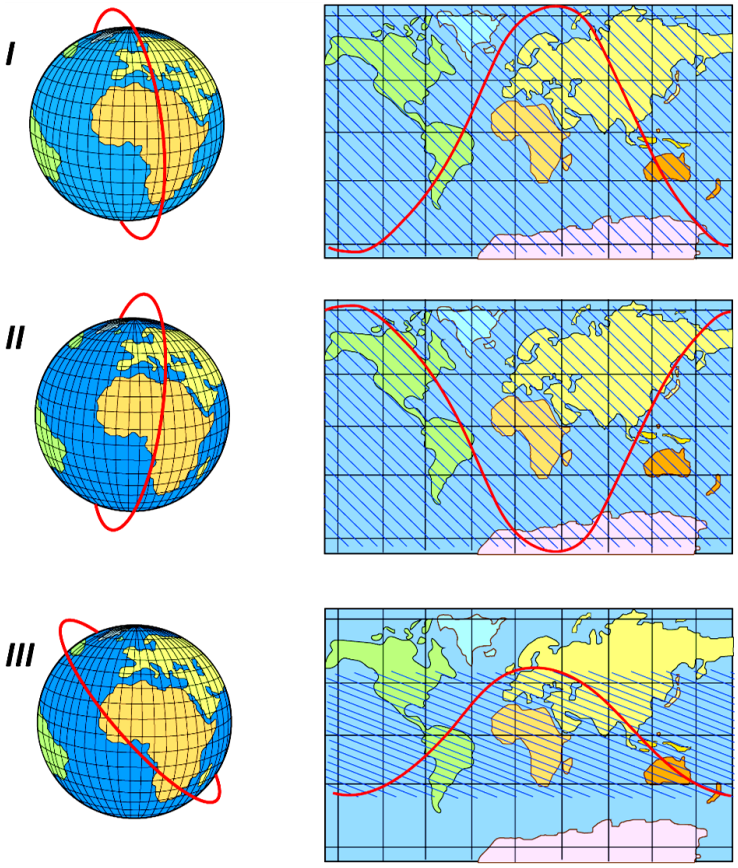


Рис. 10.14. *Види орбіт ШСЗ і широтні пояси охоплення зніманням за різного нахилу орбіт: I – пряма субполярна орбіта;*
II – зворотна субполярна орбіта; III – пряма нахилена орбіта

Цей поділ залежить від напрямку запуску супутника відносно обертання Землі. Нахил орбіти ШСЗ є важливим параметром, оскільки визначає широтний пояс поверхні Землі, який підлягає зйомці. Траса польоту ШСЗ не може вийти за межі цього широтного поясу, тому від нахилу і висоти орбіти залежить ширина фотографічної смуги. Тут встановлюється пряма залежність: чим більший кут нахилу орбіти і чим більша її висота, тим ширша смуга земної поверхні, що підлягає зйомці.

Кут нахилу площі орбіти носія *i* до площини екватора та обертання планети навколо власної осі впливають на дотримання величин повздовжнього і поперечного перекриття знімків. Наприклад, при зйомці з екваторіальної орбіти обертання планети змінює величину повздовжнього перекриття між знімками в маршруті. При цьому поперечне перекриття між маршрутами відсутнє. Якщо зйомка здійснюється з полярної орбіти, то обертання планети не змінює повздовжнє перекриття між знімками, але спричиняє поперечний зсув одного знімка відносно іншого. Проте, зважаючи на велику швидкість носія знімальної системи, ці зміни є доволі малими.

Таким чином, в результаті попереднього аналізу можуть бути визначені діапазони допустимих висот ($H_{min} – H_{max}$) і нахилів ($i_{min} – i_{max}$) колових орбіт КА мережі.

Питання для самоконтролю

1. *Назвіть переваги супутникових знімків.*
2. *Як впливають параметри орбіти космічної платформи на якість знімків?*
3. *Як впливають параметри атмосфери на якість знімків?*
4. *У чому причина збуреного руху супутника по орбіті?*
5. *Що розуміють під сонячно-синхронною орбітою?*
6. *Що відносять до кеплерівських елементів орбіти?*
7. *З якою швидкістю рухається по поверхні Землі проєкція супутника, якщо висота орбіти становить 900 км?*

XI. СУПУТНИКОВІ ЗНІМКИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Супутникова зйомка здійснюється з висот, що становлять сотні і тисячі кілометрів, тому супутникові знімки порівняно з аерознімками є дрібномасштабними. Для того щоб укрупнити масштаб знімків, доводиться збільшувати розрізненність. Крім того, висоти фотографування під час супутникової зйомки змінюються у великих межах, як за рахунок взаємного розташування траєкторії супутника й небесного тіла, так і за рахунок кривизни траєкторії та сферичності поверхні небесного тіла, а це зумовлює значну різномасштабність знімків.

При оцінці можливостей супутникової зйомки ключовими факторами є площа зйомки (смуга охоплення), продуктивність знімальної системи за один виток і періодичність зйомки.

11.1. Загальні визначення

Зображення – просторове двовимірне чи тривимірне подання реально існуючих у світі об'єктів або сцени, отримане внаслідок оброблення первинних даних ДЗ.

Супутникове зображення – двовимірне плоске подання частин земної поверхні та об'єктів на ній так, як вони виглядають з космосу.

Цифрове зображення (рис. 11.1) ***являє собою двовимірну безліч індивідуальних елементів відображуваної картини, що називаються пікселями, упорядкованих в рядках і стовпцях***.

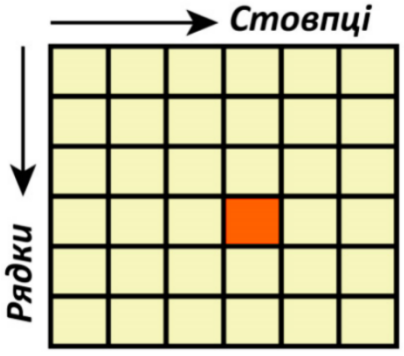


Рис. 11.1. *Структура цифрового зображення*

Кожний піксель відображає певну площину на поверхні Землі і характеризується значенням інтенсивності та адресою місця розташування в двовимірному зображенні.

Супутниковий знімок – це двовимірне зображення реальних об'єктів із супутників, що отримане за певними геометричними і радіометричними (фотометричними) законами шляхом дистанційної реєстрації власної або відбитої яскравості об'єктів (явищ та процесів) і яке призначене для дослідження видимих і прихованих об'єктів навколишнього світу шляхом дешифрування,

виміру і картографування, а також для визначення їх просторового місця розташування, якісного та кількісного дослідження.

Сцена – штучно вирізаний з вихідного знімка (який може бути дуже довгою смугою) фрагмент стандартного розміру, найчастіше ще й границями, що наближено мають задане положення (за певною стандартною сіткою).

Залежно від способу одержання, зображення ДЗ можуть буть як *аналогові*, так і *цифрові*.

Аерофотографії являють собою приклади аналогових зображень, в той час як супутникові знімки, одержані за допомогою електронних датчиків (сенсорів), є прикладами цифрових зображень.

Інтенсивність кожного пікселя оцифровується і записується в пам'ять комп'ютера як певне число, що представлене набором двійкових цифр, кратних 2*N*. Кількість розрядів – біт квантування *N* визначає *радіометричне розрізнення* зображення. Наприклад, будь-яке 8-розрядне число розташується в діапазоні від 0 до 255 ($2^8 - 1$). Зареєстроване приймачем значення інтенсивності повинно бути масштабовано і квантовано таким чином, щоб по можливості заповнити весь цей діапазон.

При *радіометричному калібруванні* зображення з цифрового значення пікселя може бути отримано фактичне значення його інтенсивності.

Адреса кожного пікселя задається координатами конкретних рядків і стовпців зображення.

Для створення двовимірного зображення при ДЗ використовується просторове сканування – послідовний перегляд досліджуваної яскравісної сцени на підстильній поверхні чутливими приймачами випромінювання. У випадку одноелементної реєструючої системи, коли чутливим детектором використовується одноелементний фотоприймач, сканування здійснюється системою дзеркал механічно. При цьому обертання дзеркала забезпечує розгортку зображення поперек траси польоту. Сканування по напрямку польоту здійснюється переміщенням супутника по орбіті (рис. 11.2).

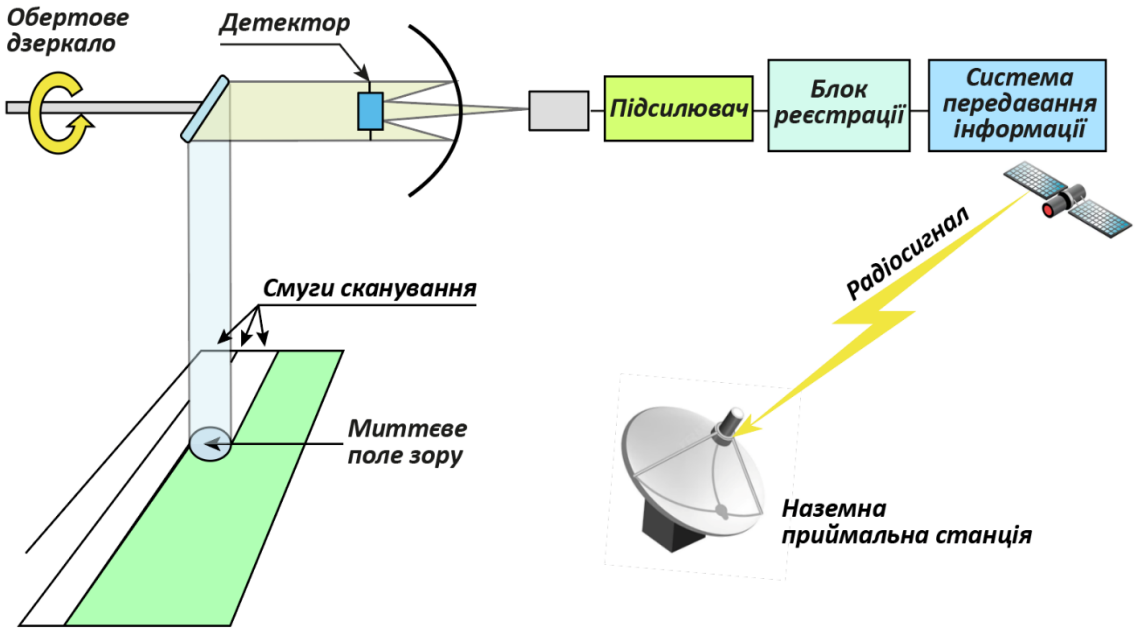


Рис. 11.2. *Скануючий ІЧ-радіометр з лінійною механічною розгорткою*

Спосіб сканування підстильної поверхні багатоелементною лінійкою приймачів, коли весь рядок зображення експонується усіма приймальними елементами лінійки одночасно, подано на рис. 11.3.

Від ділянки спостережуваної поверхні, покритої тільки одним пікселем, можна одержати одночасно кілька вимірів у різних спектральних каналах. Кожний незалежний вимір формує образ, що несе цілком певну інформацію відносно відображуваної ділянки.

"Додаванням" таких зображень від однієї і тієї ж зони разом може бути сформоване *багатошарове зображення*, де кожне складове зображення є окремим шаром.

Наприклад, датчик HRV (High Resolution Visible) супутника SPOT, що працював у мультиспектральному режимі, реєстрував випромінювання в трьох спектральних каналах: зеленому (500…590 нм), червоному (610…680 нм) і NIR (790…890 нм). Таким чином, будь-яка мультиспектральна сцена SPOT складалась з трьох зображень різної інтенсивності, що вимірювалась у трьох спектральних каналах. У цьому випадку кожен піксель сцени мав три значення інтенсивності, які відповідали трьом спектральним каналам.

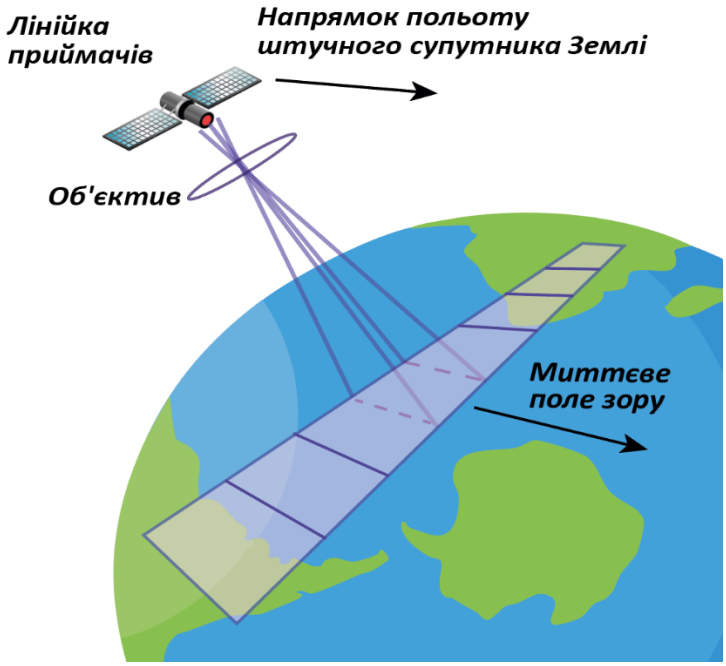


Рис. 11.3. *Сканування лінійкою багатоелементних приймачів*

Багатошарові зображення можуть бути і в середині ГІС об’єднанням зображень, отриманих не тільки від різних супутників сенсорів, але й з інших допоміжних джерел даних. Наприклад, багатошарове геозображення може складатись з трьох шарів різних океанографічних параметрів: шару зображення супутника NOAA з ТПО (Thermal Processing Option), шару зображення радара з синтезованою апертурою Sentinel-1 і шару, що складається з карти динамічної топографії морської поверхні, отриманої за даними супутникового альтиметра Sentinel-3. На рис. 11.4 наведено ілюстрацію багатошарового зображення, що складається з чотирьох шарів.

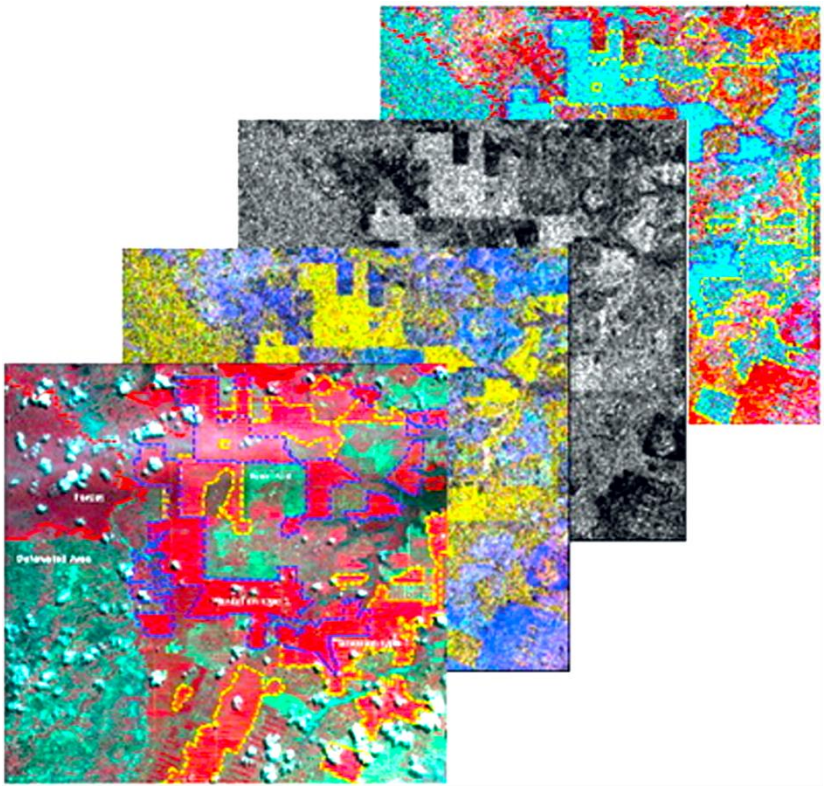


Рис. 11.4. *Ілюстрація багатошарового зображення, що складається з п'яти шарів*

Ширина повної сцени відповідає ширині смуги захоплення. Сцени добуваються з потоку за певною схемою (правилами), щоб відповідати ділянкам на місцевості. Зазвичай схема нарізки потоку на сцени називається WRS (World Reference System – світова система прив'язки). WRS використовується такими системами ДЗЗ, як Landsat (США) і IRS (Індія). В термінології програми SPOT – це GRS (Grille de Reference SPOT). Схеми мають відмінності, що обумовлені параметрами руху супутника і характером зйомки, але основоположний принцип один. WRS це сітка "шляхів" (прольоти супутника) і "рядів" (паралелі), що покривають поверхню Землі. Перетинання шляхів і рядів утворюють безліч номінальних центрів сцен. WRS дозволяє користувачам позиціонувати, каталогізувати і запитувати зображення будь-якої частини земної поверхні вказівкою номінального центра сцени, який задається параметрами "шлях" (Path) і "ряд" (Row).

Багатоспектральне зображення – два чи більше зображення тієї самої сцени, отримані одночасно в різних діапазонах електромагнітного спектра [13].

Панхроматичне (моноспектральне) зображення – зображення сцени, отримане технічним засобом ДЗЗ в одному спектральному каналі.

Знімки бувають *аналоговими* і *цифровими*.

Аналогові знімки – це знімки, зафіксовані на матеріальному носієві в аналоговому вигляді (фотографічні знімки).

Цифрові знімки – це впорядкований масив цифрових сигналів, отриманий у процесі сканування об'єкта або його оптичного зображення знімальною апаратурою і збережений у стандартному форматі.

Зображення цифрових знімків утворюється з окремих однакових елементів – *пікселів,* яскравість кожного пікселя характеризується одним числом.

При виконанні практичних робіт потрібно відрізняти вихідні (первинні) знімки, які отримані безпосередньо в результаті зйомки, від їх копій і перетворених знімків, що надходять до споживачів після попередньої обробки.

При фотографічній (аналоговій) зйомці вихідним знімком вважається оригінальний фотонегатив, при сканерній – "сирий" файл із записом зображення цифрового знімка без будь-якого його корегування.

Супутниковий знімок за своїми геометричними властивостями принципово не відрізняється від аерознімка, але має особливості, які пов'язані з:

– фотографуванням з великих висот;

– з великою швидкістю носія знімальної апаратури (що потребує більш коротких витримок при зйомці).

11.2. Основні характеристики супутникових знімків

Знімки як інформаційні моделі місцевості характеризуються низкою властивостей, серед яких виділяють *образотворчі (зображальні)*, *радіометричні* і *геометричні*.

Образотворчі властивості характеризують здатність знімків відтворювати дрібні деталі, кольори і тонові градації об'єктів.

Радіометричні властивості свідчать про точність кількісної реєстрації знімком яскравостей об'єктів.

Геометричні властивості характеризують можливість визначення за знімками розмірів, довжин і площ об'єктів та їх взаємне розташування.

Основними характеристиками супутникових знімків є такі:

1. Висока оглядовість знімків забезпечується просторовим охопленням великих площ, що дозволяє проводити одночасне знімання на величезних територіях за однаковими умовами, а отже, виконувати дослідження в глобальному і навіть планетарному масштабі. Оглядовість знімка вимірюється в одиницях площі. Розмір супутникового знімка дозволяє побачити все зображення одночасно, не "переводячи погляду", без послідовного огляду. При збільшенні масштабу знімка проєкційним шляхом оглядовість знімка зберігається, а рівень генералізації знижується.

За оглядовістю (охопленню території одним знімком) знімки поділяють на:

1) глобальні, що охоплюють усю планету. Ширина зони охоплення більше 10 000 км, а територіальне охопленістю становить сотні мільйонів квадратних кілометрів;

2) великорегіональні, що відображають материки, їх частини і великі регіони, – знімки з метеорологічних супутників на навколоземних орбітах, а також знімки малого і середнього розрізнення з ресурсних супутників. Ширина зони охоплення варіюється від 3 тис. км у знімків малого розрізнення до 500 км у знімків середнього розрізнення, територіальне охоплення становить мільйони квадратних кілометрів. На одному знімку цього типу зобразиться Західна Європа, майже вся Австралія, Середня Азія, Тибет;

3) регіональні, на яких зображені регіони і їх частини, – це знімки з ресурсних і картографічних супутників, а також з пілотованих кораблів і орбітальних станцій. Найбільш поширеним охопленням є 350х350 км^2, 180х180 км^2, 60х60 км^2. На знімку подібного охоплення зобразиться така держава, як Бельгія, невеличка область, наприклад Київська, великі мегаполіси;

4) локальні, на яких зображуються відносно невеличкі ділянки місцевості, – знімки з супутників для детального спостереження і великомасштабного топографічного картографування з охопленням близько 10х10 км^2. На такому знімку зобразиться промисловий комплекс, велике господарство, невеличке місто.

2. Комплексне відображення компонентів геосфери. На супутникових знімках одночасно відображуються різні компоненти геосфери – літосфера, гідросфера, біосфера, що дозволяє системно вивчати їхню взаємодію та взаємозв'язок.

3. Регулярна повторюваність зйомки. Інтервали між зйомкою можуть становити роки, місяці, години, хвилини, що важливо при організації моніторингів.

4. Генералізація зображення полягає в значному узагальненні зображення. Характер геометричного й тонового узагальнення рисунка залежить від низки технічних (масштаб, розрізненність знімка, метод зйомки, спектральний діапазон) та природних (вплив атмосфери, особливості території) чинників.

У результаті генералізації спрямляються лінії, відбувається спрощення форм, узагальнення кольорів і тонів, чорні і білі тони заміняються менш контрастними. Зображення багатьох об'єктів земної поверхні звільняється від деталей, в той же час розрізнені деталі об'єднуються в єдине ціле, тому на перший план виходять найбільш істотні властивості об'єктів, що дуже важливо при ландшафтних дослідженнях для виявлення різних рівнів ландшафтних структур.

Потрібний ступінь генералізації досягається спеціальними засобами. Наприклад, підбором відповідного масштабу знімка. Вплив генералізації на дешифрованість може бути як позитивним, так і негативним. З одного боку, сильне узагальнення супутникового зображення зменшує можливість точного картографування і може спричинити помилки. З іншого боку, це є важливою перевагою знімків, оскільки в результаті генералізації з'являється новий зміст і супутникові знімки можна використовувати безпосередньо для тематичного картографування.

Масштаб і оглядовість (форма, розмір) супутникових знімків дозволяють виявляти об'єкти різного рангу, знятих одночасно в одному режимі зйомки.

За масштабом знімки поділяються на групи:

– *дрібномасштабні* (1:10 000 000–1:100 000 000), що отримуються з геостаціонарних орбіт і з метеосупутників;

– *середньомасштабні* (1:1 000 000–1:10 000 000), типові для зйомок з пілотованих кораблів і орбітальних станцій;

– *великомасштабні* (більші від 1:1 000 000), що отримуються зі спеціальних картографічних супутників.

Масштаби супутникових знімків залежать від:

• висоти зйомки;

• характеристик знімального пристрою;

• коефіцієнта збільшення;

• кутів нахилу;
• кривизни земної поверхні.

Властивості знімків, що отримані в різних діапазонах і різною знімальною апаратурою, істотно відрізняються. Кадрові, передусім фотографічні, знімки відрізняються геометричною точністю, найбільш придатні для точних вимірів.

Як уже зазначалось вище, за видом зйомки супутникові знімки поділяють на фотографічні, фототелевізійні, сканерні, багатоелементні ПЗЗ-знімки, теплові інфрачервоні, радіометричні, радіолокаційні.

Найважливішими характеристиками знімка є *просторова*, *радіометрична*, *спектральна* та *часова* розрізненності. Ці параметри визначають можливості дешифрування на супутникових знімках різних об'єктів та виконання тих завдань, які доцільно виконувати за їх допомогою.

Просторова розрізненність *(на місцевості) – характеристика зображення, створювана видовим технічним засобом ДЗЗ, яку визначає розмір найменшого компактного об'єкта або ширина видовженого об'єкта певного контрасту, який можна визначити (розрізнити) на цьому зображенні з заданою імовірністю [23].*

Ця величина характеризує розмір найменших об'єктів, які можна розрізнити на знімку. Значення просторової розрізненності залежить від величини *апертури* (рис. 11.5) й *висоти зйомки*.

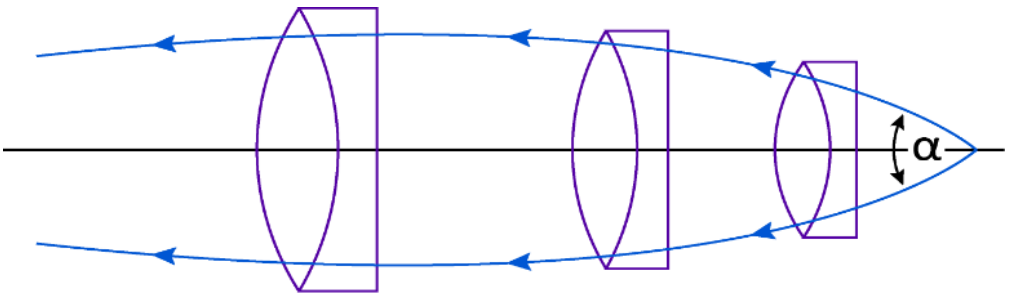


Рис. 11.5. *Кутова апертура*

Просторова розрізненність (розмір пікселя) – це параметр, який пов'язаний з розміром пікселя – ділянкою на поверхні Землі, яка покривається одним пікселем. Наприклад, якщо площа вкрита пікселем розміром 1 на 1 метр, то просторове розрізнення буде 1 метр. Чим вище розрізнення зображення, тим менший розмір пікселя, тим вища детальність.

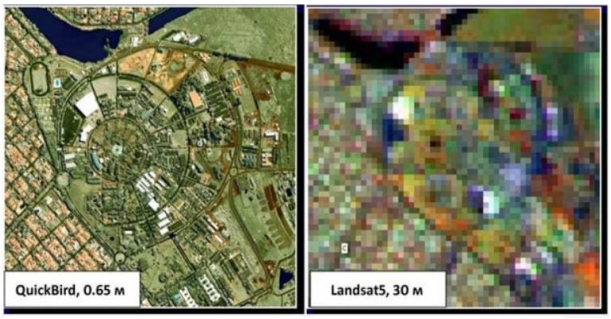
Апертура – це діючий отвір оптичного приладу, зумовлений розмірами лінз або діафрагми.

Кутова апертура – кут між крайніми променями конічного світлового пучка, що входить у систему.

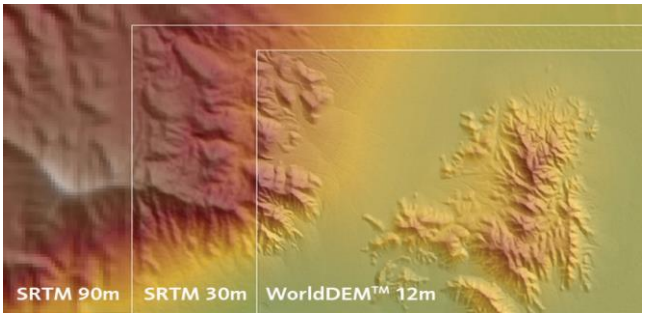
$$A = n \cdot \sin\alpha/2,$$

де n – показник переломлення середовища, в якому знаходиться предмет.

На рис. 11.6 подано порівняння просторової розрізненності, отриманої з супутників TerraSAR-X і TanDEM-X.



Приклади різної просторової розрізненності різних супутників



Просторова розрізненність WorldDEM (супутник TanDEM-X) у порівнянні з SRTM 90 та SRTM 30 (TerraSAR-X)

Рис. 11.6. *Порівняння просторової розрізненності*

Радіометрична розрізненність – найменша різниця інтенсивностей сигналів, що надходять від об'єкта зондування, яку може визначити (розрізнити) технічний засіб ДЗЗ [71].

Радіометрична розрізненність визначається кількістю градацій кольору, які відповідають переходу від абсолютно "чорного" до абсолютно "білого". Тобто під радіометричною розрізненністю розуміють число градацій кольору. Більшість сенсорів мають радіометричну розрізненність 6 або 8 бітів – 256 градацій. Але є сенсори і з вищою радіометричною розрізненністю (11 бітів для Ikonos і 16 бітів для Corona), що дозволяє розрізнити більше деталей у дуже яскравих областях знімка.

Спектральна розрізненність – найменша різниця частот сигналів електромагнітного випромінювання, що надходить від об'єкта зондування, яку може визначити (розрізнити) технічний засіб ДЗЗ [72].

Спектральна розрізненність – це ширина спектрального каналу, до якого чутливий датчик. Вона характеризує здатність систем ДЗЗ розрізняти певні інтервали довжин хвиль. Чим вища спектральна розрізненність, тим вужчий діапазон довжин хвиль реєструється певним каналом. При оцінюванні спектральної розрізненності розглядаються дві характеристики: кількість діапазонів (каналів) і ширина кожного з них.

Отже, спектральна розрізненність – це характеристика кожного каналу, а не всього знімка в цілому. Перші знімки мали один канал з дуже широким каналом чутливості, що охоплював видимий і частину ближнього інфрачервоного діапазону (тобто спектральна розрізненність становила 0,5 мкм). Залежно від спектральної розрізненності (кількості каналів) сенсорні системи поділяються на:

– *панхроматичні* – один широкий канал (як правило, у видимій частині спектра);

– *багатозональні (мультиспектральні)* – від 2 до 10 діапазонів (видимий, мікрохвильовий, радіодіапазон);

– *гіперспектральні* – від 30 каналів і більше (як правило, на видимій і ближній ІЧ-ділянки).

Сучасні супутникові знімки надзвичайно різноманітні за спектральним діапазоном зйомки, технологією одержання зображень і передавання їх на Землю,

також залежно від параметрів орбіти супутникового носія та знімальної апаратури, що визначають масштаб знімання, оглядовість, розрізненність знімків тощо.

Спектральна розрізненність панхроматичного знімка є вкрай низькою, оскільки на ньому неможливо виділити сигнали з різною довжиною хвилі, і отримане зображення характеризує відбивну здатність об'єкта в усьому видимому діапазоні. Більш висока спектральна розрізненність кольорових знімків пояснюється тим, що кольорова плівка має незалежну чутливість у синьому, зеленому і червоному діапазонах спектра.

***Часова розрізненність** – найменший інтервал часу, через який можливе повторне знімання сцени [71].*

Часова розрізненність визначається періодичністю одержання даних. Отримання знімків одних і тих самих ділянок земної поверхні з певною періодичністю є однією зі сфер застосування ДЗЗ. При цьому від частоти знімання залежить можливість виявлення тих або інших змін, які відбулися на території вивчення.

Абсолютна часова розрізненність систем ДЗЗ визначається періодом обертання супутника навколо Землі, при якому можлива повторна зйомка ділянки земної поверхні під тим самим кутом огляду. Цей період може становити декілька діб. Порівнюючи знімки об'єкта за різні періоди, можна спостерігати зміну його характеристик.

Для ефективного використання дослідниками цих значних матеріалів їх потрібно систематизувати, класифікувати, виділивши такі типи супутникових знімків, які розрізняються за можливостями їхнього застосування в географічних дослідженнях і тематичному картографуванні, дати оцінку знімків різного типу та рекомендації щодо їхнього застосування.

Детальність зображення – це розмір елементів зображення і їх кількість на одиницю площі.

Оцінка якості знімків здійснюється за чотирма показниками:

1) показник розрізненності знімальної камери p мм$^{-1}$ – кількість ліній на один мм для об'єктів середнього контрасту;
2) величина розрізненності на місцевості в масштабі знімка $R`$;
3) кількість елементів зображення E на 1 мм^2 площі знімка;
4) коефіцієнт оптимального збільшення V.

За детальністю знімки поділяються на [72]:

1. Знімки малої детальності (p < 5 мм$^{-1}$, $R`$ < 0,1 мм, E < 100). Робота з такими знімками доцільна в масштабі оригіналу. До них відносяться знімки, що отримуються за допомогою систем сканування системами малого розрізнення з метеорологічних супутників.

2. Знімки середньої детальності (p = 5–10 мм$^{-1}$, $R`$ = 0,05–0,1 мм, E = 100–400), що несуть інформацію, яка частково не сприймається оком, проте дозволяють працювати при незначному збільшенні у два рази. Такі знімки отримують системами сканування високого розрізнення з ресурсних супутників LandSat.

3. Знімки великої детальності (p = 10–25 мм$^{-1}$, $R`$ < 0,02–0,05 мм, E = 400–2500), що вимагають значного збільшення в 2–5 разів для більшої частини фотографічних знімків.

4. Знімки дуже великої детальності (p = 25–50 мм$^{-1}$, R` = 0,01–0,02 мм, E = 2500–10000), що несуть дуже велику інформацію на одиницю площі і потребують великого збільшення в 5–10 разів.

Можливості дешифрування деяких об'єктів при різному просторовому розрізненні знімків подано в табл. 11.1.

Таблиця 11.1

Можливості дешифрування деяких об'єктів при різному просторовому розрізненні знімків, м

Об'єкти	Виявлення	Детальне розрізнення	Виявлення характеристик
Населені пункти	50	10	0,7
Аеродроми	6	2	0,3
Залізничні колії	30	6	1,5
Мости	6	2	1,0
Літаки	5	1,0	0,2
Автомобілі	1,5	0,3	0,1
Судна	8	0,6	0,3

11.3. Класифікація супутникових знімків

Супутникові знімки (СЗ) одержують із міжпланетних автоматичних станцій, штучних супутників Землі, пілотованих кораблів і довгострокових орбітальних станцій. Від масштабу і просторового розрізнення СЗ, під яким розуміють розміри мінімального об'єкта, що розрізняється на знімку, залежать його оглядовість і генералізація зображення.

При зміні масштабу зйомки на знімку відображаються різні за величиною ділянки земної поверхні з різною генералізацією. Рівень генералізації СЗ визначає, якого рангу об'єкти можуть одночасно потрапити в поле зору дослідника. Для дослідження різномасштабних геологічних структур використовуються СЗ різних рівнів генералізації. Наприклад, при одному масштабі дешифруються шари, окремі складки, при іншому – антиклінорії і синклінорії, міжгірські впадини тощо; при третьому – складчасті пояси і платформи. Однак це не виключає того, що в кожному випадку об'єкти більш високого порядку можуть розрізнятись як деталі низькопорядкових утворень.

Розрізняють СЗ *глобального*, *континентального*, *регіонального*, *локального* і *детального* рівнів генералізації [28].

Генералізація – об'єднання дрібних елементів геологічних або ландшафтних у більш крупні.

КЗ детального рівня генералізації близькі до висотних аерофотознімків, мають високе розрізнення на місцевості і охоплюють територію до 10 000 км^2.

Наприклад, супутник WorldView-3 надає розрізненність до 0,31 см в панхроматичному, 1,24 м – у мультиспектральному і 3,7 м – у середньому інфрачервоному діапазоні. Як приклад на рис. 11.7 подано знімок шахтного комплексу в Калгурлі (Австралія).

Рис. 11.7. *Знімок шахтного комплексу з видобутку золота в Калгурлі (Австралія) з супутника WorldView-3 (орбіта приблизно 617 км)*

Супутникові знімки локального рівня генералізації відрізняються просторовим розрізненням (перші десятки метрів) і охоплюють території до 100 000 км^2. Їх отримують високоякісними фотографічними і телевізійними системами.

Супутникові знімки регіонального рівня генералізації дозволяють розпізнавати об’єкти розміром від багатьох десятків до сотень метрів на площі охоплення в перші 10–30 тисяч квадратних кілометрів. Це зазвичай фотографічні і сканерні знімки з пілотованих космічних кораблів і штучних супутників Землі.

Супутникові знімки континентального рівня генералізації (телевізійні і сканерні знімки з супутників) мають розрізнення від сотень до тисяч метрів, а площі, зображені на них, становлять від сотні тисяч до мільйонів квадратних кілометрів (окремі континенти).

Сучасні супутникові знімки дуже різноманітні і залежать від:

– *вибору способу реєстрації випромінювальних і відбивних характеристик* (тобто визначаються спектральним діапазоном зйомки);

– *технології отримання зображень і передачі їх на Землю*, що багато в чому зумовлюють якість знімків;

– *параметрів орбіти супутникового носія і знімальної апаратури*, що визначають масштаб зйомки, оглядовість, розрізненність знімків тощо.

Для забезпечення ефективного використання цього надзвичайно інформативного матеріалу його потрібно систематизувати та класифікувати, виділивши типи супутникових знімків, що відрізняються можливостями їхнього застосування

в дослідженнях і тематичному картографуванні, дати оцінку знімків різного типу і рекомендації з їх застосування.

За характером покриття земної поверхні виділяють *поодиноке картографування, маршрутну, прицільну та глобальну зйомки.*

Поодиноке (вибіркове) фотографування виконується космонавтами ручними камерами. Знімки зазвичай виходять перспективними із значними кутами нахилу.

Маршрутна зйомка виконується вздовж траси польоту супутникового апарату таким чином, щоб суміжні знімки мали поздовжнє перекриття, а під час виконання багатомаршрутної зйомки – поздовжнє й поперечне перекриття. Величина поздовжнього перекриття знімків залежить від параметрів орбіти ШСЗ і особливостей їхнього подальшого використання й коливається від 20 до 60 %. Це дозволяє одержати стереопари знімків, за якими можна отримати стереомоделі місцевості. Для забезпечення однакового перекриття знімків по всій трасі польоту супутника зйомка виконується через певні інтервали часу, які задаються програмним часовим пристроєм.

Прицільна (вибіркова) зйомка проводиться для отримання знімків спеціально заданих ділянок земної поверхні на відстані від траси. Для цього головна оптична вісь камери відхиляється від надира на визначений кут. Програмно-прицільне знімання – основний вид супутникової зйомки для отримання знімків надвисокої розрізненності.

Глобальна зйомка виконується з геостаціонарних і полярно-орбітальних супутників. 4–5 геостаціонарних супутників на екваторіальній орбіті забезпечують практично безперервне отримання дрібномасштабних оглядових знімків усієї Землі, за винятком приполярних територій.

Вибір висоти польоту супутника зумовлений завданням, що виконується під час зйомки, і необхідністю одержання знімків певного масштабу. Для отримання глобальної інформації зйомку проводять із високоорбітальних супутників з висотою орбіти близько 30–40 тис. км. Такі зображення одержують, наприклад, з американських високоорбітальних супутників ATS, з автоматичних міжпланетних станцій. Найбільш дрібний масштаб зображення Землі отримано з радянського міжпланетного космічного апарата "Зонд-7" із відстані близько 70 тис. км. Фотознімання виконано з орбіти Місяць-Земля в оригінальному масштабі 1:175 000 000.

Супутникова зйомка з метеорологічних ШСЗ, які досліджують атмосферу й процеси, що в ній відбуваються, здійснюється з висот 600–1500 км; вони дають інформацію, необхідну для прогнозування погоди в глобальному й локальному масштабах.

У разі детального вивчення місцевості космічне знімання виконується з низьких орбіт. Для дослідження природних ресурсів Землі й тематичного картографування зазвичай використовують орбіти з висотами 150–450 км. Такі знімки одержані з пілотованих космічних кораблів "Союз", "Gemini", "Apollo", орбітальних станцій "Салют", "Scaylab", "Мир" і ШСЗ, призначених для дослідження природних ресурсів Землі – "Космос", "Метеор-Природа", "Landsat", SPOT та ін.

Для одержання детальних знімків з розрізненністю на місцевості, яка становить кілька метрів і частки метра, знімання виконують з орбіт тієї ж висоти за допомогою довгофокусних камер (КФА-1000, КФА-3000) [31].

11.4. Порівняння характеристик аеро- та супутникових зйомок

Умови проведення супутникової зйомки відрізняються від умов, у яких здійснюється аерозйомка земної поверхні, тому супутникові знімки мають низку відмінностей від аерознімків.

1. Супутникова зйомка здійснюється з набагато більших висот, ніж аерозйомка. Висоти зйомки становлять сотні й тисячі кілометрів, тому супутникові знімки є дрібномасштабними порівняно з аерознімками. Для того щоб збільшити масштаб знімків, доводиться збільшувати фокусну відстань фотокамери, тобто використовувати більш довгофокусні фотокамери, ніж під час аерозйомки. Крім того, висоти фотографування під час знімального сеансу змінюються у великих межах як за рахунок взаємного розташування траєкторії супутникового апарату й небесного тіла, так і за рахунок кривизни траєкторії та сферичності поверхні небесного тіла, а це зумовлює значну різномасштабність знімків.

2. У зв'язку зі зміною висот зйомки у великих межах зростають вимоги й до дотримання величини повздовжнього перекриття знімків. При зйомці з постійним інтервалом фотографування відсоток повздовжнього перекриття на великих висотах фотографування буде близький до максимального значення й поступово зменшуватися у міру наближення носія фотокамери до планети, досягнувши найменшого значення на мінімальній висоті, а потім, з віддаленням носія від планети, знову буде збільшуватися. Відповідно, фотознімання з постійним інтервалом фотографування приводить до отримання надмірної кількості знімків, а отже, до великих витрат знімального матеріалу, а це вимагає його значного запасу на борту. Тому під час супутникової зйомки потрібно використовувати електронний командний прилад, який відповідно до показників допплерівського вимірювача швидкості, а також радіо- або лазерного висотоміра змінював би інтервал фотографування й витримував постійною величину поздовжнього перекриття знімків.

Під час супутникової зйомки поперечне перекриття знімків можливе при фотографуванні з орбіти супутника тільки в тому разі, коли за рахунок обертання планети під час польоту носія на наступному витку буде фотографуватися сусідня смуга поверхні. При цьому в районі екватора поперечне перекриття буде мінімальним, а в районах, близьких до полюсів, – максимальним.

3. *Потрібно враховувати зміну освітленості вздовж траси польоту через зміну висоти Сонця над горизонтом*. У зв'язку з цим знімальна система повинна мати автомат регулювання експозиції. Відсутність його є причиною погіршення якості знімків, втрати дрібних і малоконтрастних контурів та врешті-решт – до зниження вимірювальних і дешифрувальних характеристик знімків.

4. Оскільки фотокамера встановлена в герметичному відсіку носія, де підтримуються задані температура й тиск, *на геометрію побудови зображення*

впливає ілюмінатор, через який здійснюється фотографування, а також внутрішня фотограмметрична рефракція, яка виникає через проходження оптичними променями надзвичайно різних середовищ по обидва боки ілюмінатора. У той же час при фотографуванні планет, які не мають атмосфери, відсутній вплив атмосферної рефракції.

Відповідь на питання, яка зйомка є найкращою, дають дані, наведені в табл. 11.2.

Таблиця 11.2.

Характеристики дистанційних зйомок

Оптичні супутникові зображення	***Аерофотознімки (на плівці)***
1	***2***
Ціна зростає пропорційно збільшенню площі	***Зі збільшенням площі ціна зростає в меншому ступені***
Дані фіксуються в цифровому вигляді, тому не потрібно обробляти плівку	***Дані зазвичай записуються на плівку. Потрібне сканування і корекція за напрямком польоту***
Хмарність є великою проблемою. Період повторної зйомки від 3 днів і більше	***Літак може літати нижче від хмар або повторити політ наступного дня***
Мінімальна площа замовлення складає усього 64 кв. км	***Аерофотозйомка нерентабельна для невеликих площ***
Ніякого узгодження для проведення супутникової зйомки не потрібно	***Процедура планування та узгодження проведення аерофотозйомки складна і займає багато часу***
На даний час найкращою вважається просторова розрізненність ЗО см	***Можна отримувати зображення з розрізненністю до декількох сантиметрів залежно від висоти польоту***
Одночасно отримують зображення у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах	***Плівкові камери зазвичай отримують окремо кольорові й інфрачервоні зображення***
Одна сцена покриває площу міської забудови 8х8 км або 16 х 16 км	***На знімках масштабу 1:40 000 з розміром піксели 1 м використовувана площа одного кадра дорівнює 3,6 км х 6,4 км***
Складання мозаїки забирає менше часу	***Складання мозаїки забирає більше часу***
Через поширеність супутникових орбіт, наближених до полярних, кращим є напрямок отримання зображень з півночі на південь, ніж зі сходу на захід	***Напрямок отримання зображень не має значення***

Продовження таблиці 11.2

1	*2*
Середній термін надходження зображення після замовлення становить 8 днів. Для деяких хмарних / дощових районів термін може збільшуватися до місяця	***Термін надходження зображення залежить тільки від доступності літака і від льотної погоди***
Швидкість і зручність обробки цифрових даних у камеральних умовах	***Трудомісткість і як наслідок цього– великі витрати при обробці результатів аерофотозйомки в камеральних умовах***
Можливість покриття одним знімком великих площ без необхідності наступної "зшивки" окремих фрагментів	***Необхідність зшивки невеликих фрагментів у єдиний масив***

Характеристиками, що визначають затребуваність супутникових знімків сьогодні, є:

– *об'єктивність* – кожний супутниковий знімок є документом, що об'єктивно відображає стан місцевості на момент зйомки. Підробити космічне зображення практично неможливо, оскільки зйомки виконують різні компанії-оператори і спроби змін даних легко виявляються;

– *актуальність* – матеріали супутникової зйомки можна отримувати на різні дати, включаючи зйомки на замовлення;

– *масштабність* – сучасні прилади дозволяють одночасно виконувати зйомки значних за площею територій із доволі високим рівнем розрізнення;

– *екстериторіальність* – ділянки зйомки жодним чином не прив'язані до державних і територіальних кордонів, а для проведення зйомки не потрібний будь-який дозвіл;

– *доступність* – сьогодні дані ДЗЗ з просторовим розрізненням 2 м і нижче є відкритими, а процедура замовлення і одержання даних є доволі простою. Дані ДЗЗ, отримані за допомогою супутників, найчастіше жодним іншим способом отримати неможливо.

11.5. Аналіз задач, що розв'язуються за допомогою супутникових зйомок

Співвідношення між просторовою розрізненністю знімків і завданнями, що вирішуються за їхньою допомогою, подано на рис. 11.8, з якого видно, що значна частина завдань потребує просторової розрізненності зображень не менше 5 м [8].

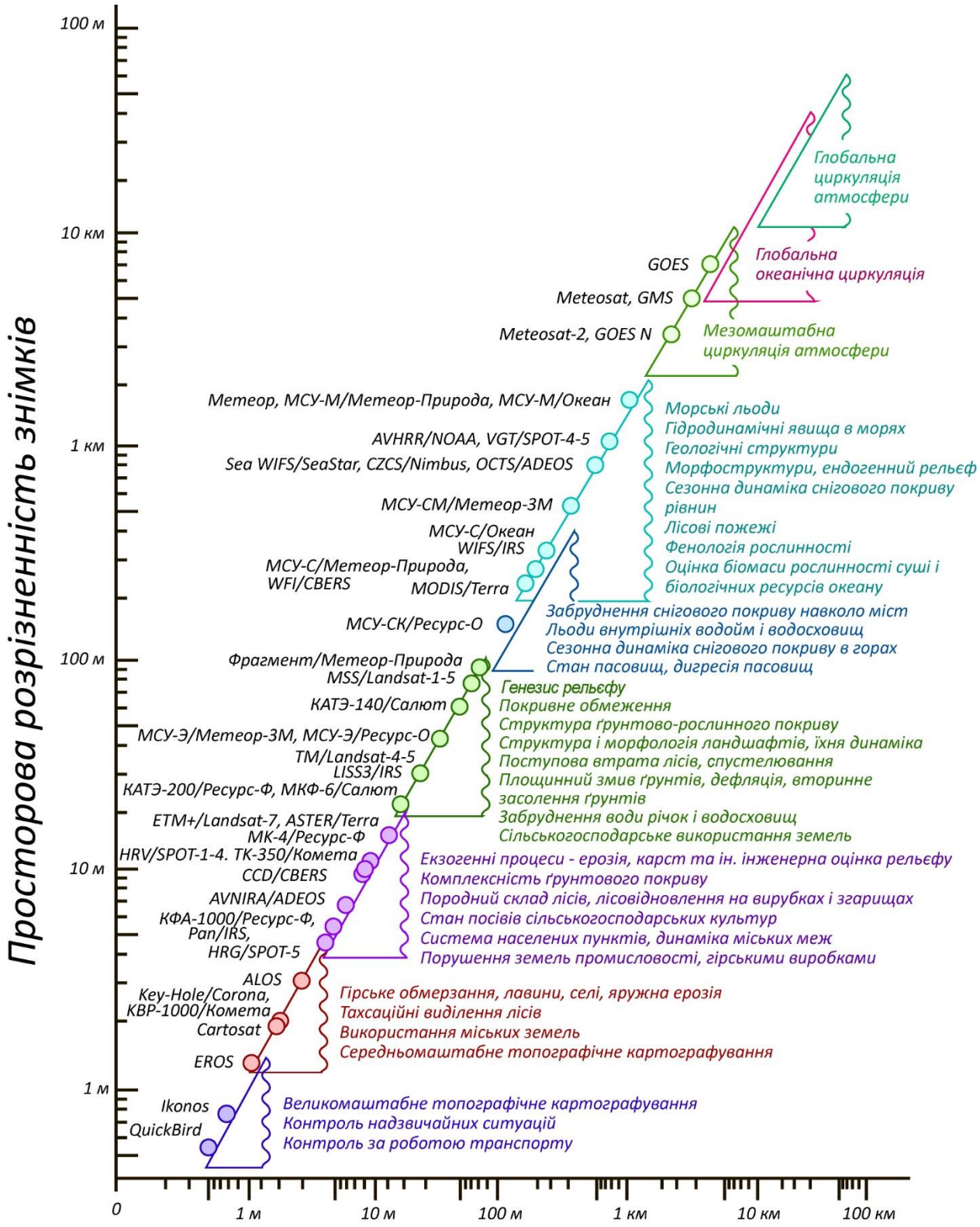


Рис. 11.8. *Співвідношення між просторовою розрізненністю знімків і завданнями, що виконуються за їхньою допомогою*

Зрозуміло, що надання космічної інформації у визначені терміни також має важливе значення. Це стосується, в першу чергу, прогнозування метеорологічної ситуації, оцінки стихійних явищ та їх наслідків, де дані повинні надходити до фахівців негайно.

Більшість завдань, таких як оцінка врожаїв, лісового фонду, картографування, залежно від мети припускають використання інформації через певний час після зйомки – від декількох годин до декількох днів і навіть місяців.

Іноді доцільним є періодичне повторне проведення знімання одного й того ж об'єкта для виявлення тенденцій його зміни або закономірностей прояву певних явищ (повені, лісові пожежі, деградація природних ландшафтів). У той же час у деяких дослідженнях, наприклад, вивченні надр, інтервал часу між отриманням інформації і наданням її користувачеві не має великого значення, і навіть дані, отримані задовго до початку дешифрування, можуть виявитися більш цінними. Тим паче не всім користувачам і не для всіх завдань потрібні дороговартісні канали зв'язку та передачі й оперативної обробки матеріалів ДЗЗ.

Щодо оглядовості даних ДЗЗ, то для різних завдань існує потреба як у зображеннях глобального масштабу, так і локального, зі смугою спостереження вздовж траси польоту в декілька десятків кілометрів. Найчастіше це діапазон від 110 до 200 км.

Особливої уваги заслуговує такий параметр, як діапазони спектра електромагнітного випромінювання. На рис. 11.9 подано розподіл кількості завдань згідно з потребою даних ДЗЗ в різних діапазонах спектра ЕМВ [8].

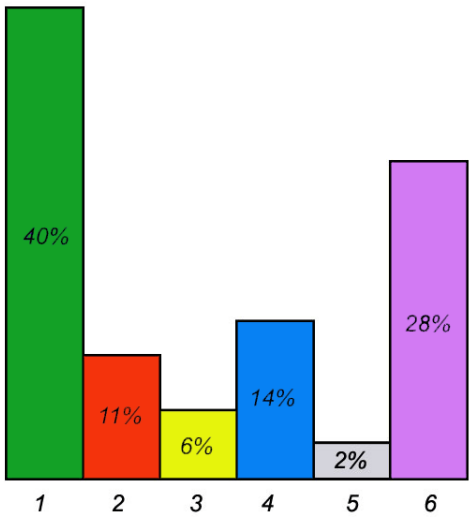


Рис. 11.9. *Розподіл кількості завдань згідно з потребою даних ДЗЗ в різних діапазонах спектра електромагнітного випромінювання:*
1 – видимий діапазон, зокрема багатозональна зйомка;
2 – видимий та ближній ІЧ діапазон; 3 – видимий та тепловий ІЧ діапазони; 4 – видимий та весь ІЧ діапазон; 5 – видимий та мікрохвильовий діапазони; 6 – весь діапазон пасивного та активного зондування

Щодо знімків у різних спектральних діапазонах та використання матеріалів ДЗЗ для конкретних завдань треба зазначити наступне: бажано б було використовувати зображення в усіх діапазонах спектра електромагнітного випромінювання. Однак у цьому разі обсяг інформації був би надзвичайно великим, що значно б ускладнювало аналіз. Тому потрібний певний компроміс – все ж таки зупинятись на тій апаратурі та діапазонах, які є найбільш придатними для досягнення певних цілей.

11.6. Методи отримання геоінформації зі знімків

Необхідна для досліджень інформація (предметно-змістова і геометрична) добувається двома основними методами: *дешифруванням* і *фотограмметричною обробкою*. Обидва методи використовують як традиційні технології, що засновані на візуальній обробці аналогових знімків, так і комп'ютерні, які автоматизують ці процеси під час роботи з цифровими знімками.

Дешифрування, яке повинне дати відповідь на основне питання: що зображено на знімку, – дозволяє отримувати предметну, тематичну (головним чином якісну) інформацію про досліджуваний об'єкт або процес, його зв'язки з навколишніми об'єктами.

У візуальному дешифруванні зазвичай виділяють читання знімків та їх інтерпретацію (тлумачення). Уміння читати знімки ґрунтується на знанні дешифрувальних ознак об'єктів і образотворчих властивостей знімків. Глибина ж інтерпретаційного дешифрування багато в чому залежить від рівня підготовки виконавця. Чим краще дешифрувальник знає предмет свого дослідження, тим більш повною і більш достовірною буде інформація, добута зі знімка.

Фотограмметрична обробка покликана дати відповідь на питання, де знаходиться досліджуваний об'єкт і які його геометричні характеристики – розмір, форма. Вона дозволяє визначити за знімками планове і просторове положення об'єктів та динаміку їх змін у часі. Для фотограмметричних вимірів знімків застосовують спеціальні прецизійні оптико-механічні прилади, а також комп'ютерні комплекси зі спеціалізованим програмним забезпеченням.

Комп'ютерні технології. На сучасному етапі розвитку ДЗЗ розроблено численні алгоритми і програми комп'ютерної обробки зображень. Для обробки аеро- та супутникових знімків на комп'ютерах можна використовувати комерційне програмне забезпечення загального призначення, таке як Adobe Photoshop, Corel PHOTOPAINT. Однак значно більші можливості надають професійні програмні продукти, серед яких найбільш відомими є ERDAS Imagine, ER Mapper, ENVI. Крім того, на ринку геоінформаційних послуг представлені пакети спеціалізованих програм, призначених для виконання конкретних завдань, наприклад, топографічного картографування на цифрових фотограмметричних системах PHOTOMOD, Талка, ЦНИИГАиК (Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии). Сучасні комп'ютерні технології дозволяють виконувати такі групи завдань:

– візуалізація цифрових знімків;

– геометричні і яскравісні перетворення знімків, включаючи їх корекцію;

– конструювання нових похідних зображень за первинними знімками;

– визначення кількісних характеристик об'єктів;

– комп'ютерне дешифрування знімків (класифікація).

Найбільш складним є завдання комп'ютерного (автоматизованого) дешифрування, яке становить фундаментальну проблему ДЗЗ як наукової дисципліни і для вирішення якої додавалося і додається багато зусиль.

Під час візуального дешифрування знімків виконавцю доводиться на підставі дешифрувальних ознак визначати, впізнавати об'єкти, а також виділяти однакові, однорідні об'єкти. Для виконання цих евристичних процедур за допомогою комп'ютера застосовують найбільш поширений підхід, заснований на спектральних ознаках, якими слугує набір спектральних яскравостей, що зареєстровані багатозональним знімком.

Формальне завдання комп'ютерного дешифрування знімків зводиться до класифікації – послідовного сортування всіх пікселів цифрового знімка на декілька груп. Для цього запропоновані алгоритми класифікації двох видів – з навчанням і без навчання, або кластеризації (від англ. *cluster* – скупчення, група). При класифікації з навчанням пікселі багатозонального знімка групуються на підставі порівняння їх яскравостей у кожній спектральній зоні з еталонними значеннями. При кластеризації ж усі пікселі поділяють на групи-кластери за якоюсь формальною ознакою, не вдаючись до навчальних даних. Потім кластери, отримані в результаті автоматичного групування пікселів, дешифрувальник відносить до тих або інших об'єктів. Достовірність комп'ютерного дешифрування формально характеризується відношенням кількості пікселів, що класифіковані правильно, до їх загальної кількості і становить у середньому 70–85 %, помітно зменшуючись зі зростанням набору об'єктів, що дешифруються.

Досягнення у сфері повної автоматизації дешифрування, при якій можна було б виключити або суттєво обмежити участь людини в отриманні інформації за аеро- та супутниковими знімками, поки що скромні. Обчислювальні алгоритми, засновані на спектральних ознаках окремих пікселів, забезпечують виконання найпростіших класифікаційних завдань; вони раціонально включаються як елементи у складний процес візуального дешифрування, яке поки що залишається основним методом отримання природної і соціально-економічної інформації з аеро- та супутникових знімків. Для істотного прогресу у розвитку комп'ютерного дешифрування необхідний перехід до програмного забезпечення більш високого рівня, заснованого на знаннях експертів. Фахівці у сфері штучного інтелекту бачать вирішення проблеми автоматизації дешифрування аеро- та супутникових знімків в інтеграції формалізованих знань висококваліфікованих дешифрувальників (експертів) із можливостями сучасних комп'ютерів, тобто у створенні комп'ютерних експертних систем.

Еталонування. Отримати за допомогою дешифрування (візуального чи комп'ютерного) або фотограмметричної обробки необхідні характеристики досліджуваного об'єкта тільки за знімками без будь-яких натурних польових спостережень у більшості випадків неможливо. Наприклад, для спектрометричних визначень за багатозональними знімками, на яких ґрунтується комп'ютерне дешифрування, потрібно виконати радіометричне калібрування знімків (їх еталонування), а для отримання розміру об'єкта за знімком фотограмметричним способом потрібне його геометричне калібрування. Процедура отримання й урахування калібрувальної інформації є необхідним елементом технологічної схеми аерокосмічних досліджень. Ця інформація обов'язкова для будь-якої обробки знімків, хоча об'єм її буває різним; чим вищою вимагається точність визначень за

знімками, тим він більш істотний. Прийнято розрізняти *абсолютне* і *відносне* калібрування. Для обробки поодиноких знімків обмежуються відносним калібруванням, а для декількох, наприклад багатозональних, бажане їх абсолютне калібрування.

Додаткова інформація. Знімки як особлива форма інформації про досліджуваний геооб'єкт використовуються в комплексі з інформацією інших видів. Уже стало традицією працювати одночасно з супутниковими знімками і картами. У тематичних дослідженнях за знімком зазвичай визначають ареал поширення явища або процесу, його контур, а для отримання змістовних характеристик залучають матеріали тематичних досліджень, включаючи статистичні. Застосування знімків особливо ефективне для просторової екстраполяції результатів локальних польових спостережень.

Супутникове картографування. Підсумковою ланкою технологічної схеми супутникових досліджень у багатьох прикладних додатках є виготовлення за знімками карт, від якості яких залежить не тільки їх естетичне сприйняття, але й ступінь довіри до виконаних досліджень. Результати комплексних досліджень, що виконані з використанням аеро- та супутникових знімків, подають у вигляді серій взаємоузгоджених тематичних карт, що відображають просторові закономірності, якісні і кількісні характеристики досліджуваної території. Вони складають базову основу інтегрованих ГІС.

Питання для самоконтролю

1. *Назвіть основні характеристики супутникових знімків.*
2. *Дайте класифікацію супутникових знімків.*
3. *Порівняйте характеристики аеро- та супутникових зйомок.*
4. *Які завдання розв'язуються за допомогою супутникових зйомок?*
5. *Перерахуйте методи отримання геоінформації за аеро- та супутниковими знімками.*

XII. АНАЛІЗ СТРУКТУРИ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

12.1. Форми збереження цифрових даних супутникової зйомки

Просторові дані взагалі, а цифрові знімки зокрема можуть зберігатися в цифрових файлах з різною структурою та з різним принципом формування, збереження й подання даних. Найбільш поширеними є *растрові* та *векторні* форми збереження цифрових зображень [78; 69; 15; 6].

Цифрове аеро- або супутникове зображення земної поверхні – це дані растрового типу. Тому пакети тематичної обробки аеро- та супутникових зображень іноді відносять до ГІС растрового типу, оскільки всі основні функції пакетів орієнтовані на обробку саме цього типу даних. Дані векторного типу також використовуються, проте здебільшого виконують допоміжну функцію.

12.1.1. Растрова форма збереження цифрового зображення

У процесі сканування сенсором супутника ділянки земної поверхні генерується електричний сигнал, інтенсивність якого змінюється залежно від яскравості території. Для перетворення безперервного аналогового сигналу на цифрову форму його поділяють на частини, що відповідають рівним інтервалам дискретизації (рис. 12.1).

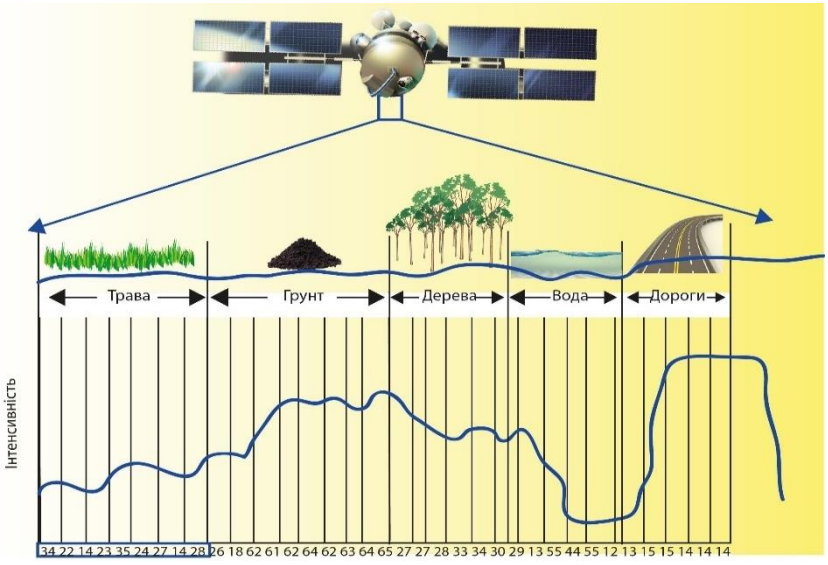


Рис. 12.1. *Схематичне подання перетворення вихідних даних на значення пікселів*

Сигнал у межах кожного інтервалу описується тільки середнім значенням його інтенсивності, тому вся інформація про варіації сигналу на цьому інтервалі втрачається. Отже, величина інтервалу дискретизації є одним з параметрів, від якого напряму залежить розрізненність сенсора. Також варто зазначити, що для

цифрових даних зазвичай обирають не абсолютну, а відносну шкалу яскравостей, тому ці дані не відбивають істинних радіометричних значень, одержаних для даної сцени.

Растрова форма збереження цифрового зображення задається масивом чисел, які описують параметри кожного пікселя прямокутної матриці.

Растрові файли відрізняються один від одного деталями, що характеризують здатність нести додаткову інформацію, але мають спільну структуру. Файл поділяється на заголовок, растрові дані та додаткову інформацію, зокрема про кольорову палітру.

Заголовок містить загальну інформацію про растрові дані файлу (ідентифікатор; версію; кількість рядків у зображенні, пікселів у рядку, бітів у пікселі; кількість колірних площин; тип стиснення; координати початку зображення; текстовий опис тощо). Якщо формат дозволяє зберігати кілька зображень, то після заголовка у файлі може розміщуватись каталог зображень.

Растровий файл зберігає точну попіксельну карту зображення, яке відтворюється програмою візуалізації.

Растрові формати призначені для збереження реальних зображень. Складні зображення, отримані зі сканувального фотографічного або відеообладнання, можуть бути збережені саме в растровому форматі.

До переваг растрових файлів відносять:

– простоту створення з існуючих піксельних даних, які записані в пам’яті як масив;

– відтворення піксельних даних, що зберігаються в растровому форматі, може здійснюватися в будь-якій системі координат, яка передбачає подання цих даних у вигляді сітки;

– піксельні значення можуть змінюватись як індивідуально, так і великими групами за допомогою палітри;

– растрові файли легко перетворюються для передачі на пристрої відображення – дисплеї, принтери, плоттери тощо.

Недоліки растрових файлів:

• мають дуже великий розмір об’єму інформації, особливо, якщо зображення багатокольорове. Застосування різних схем стиснення зменшує розмір піксельних даних, але необхідність розпаковки перед використанням значно уповільнює процес зчитування та візуалізації зображення. При цьому чим складніше растрове зображення (більша кількість кольорів та дрібних деталей), тим менша ефективність процесу стиснення;

• растрові формати погано піддаються масштабуванню та поворотам.

Як відомо, значення кожної комірки растру – це код спектральної яскравості або фотографічної щільності. Такі цифрові подання при їх відображенні на екрані або при друці утворюють зображення. Цифрові знімки зберігаються в файлах даних, які називаються також файлами зображень на магнітних стрічках, комп’ютерних дисках та в інших середовищах.

Одному пікселю зображення може відповідати декілька значень файлу даних, кількість яких визначається набором використовуваних спектральних зон (рис. 12.2) [80].

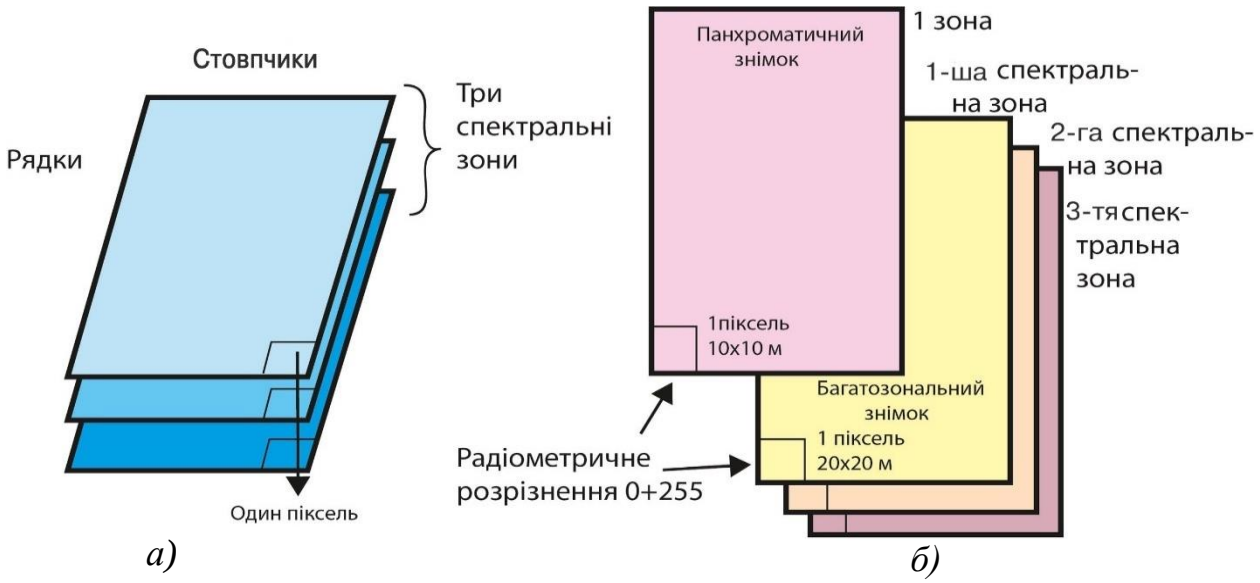


Рис. 12.2. *Піксель та зони растрового зображення*

Термін *піксель* використовується як для позначення елемента файлу зображення, так і зображення на екрані дисплея. Зазвичай один піксель у файлі відповідає одному пікселю або елементу зображення на пристрої візуалізації. Проте при збільшенні або зменшенні зображення ця відповідність порушується. Наприклад, якщо зображення відображається з коефіцієнтом збільшення "2", то один піксель у файлі буде відповідати 2 х 2 коміркам на екрані дисплея.

Растрові дані можуть також подавати кольорові зображення в палітрі *RGB*, скановані карти або карти, складені за результатами обробки знімків, що містять значення висот рельєфу поверхні (дані ЦМР, створені з використанням стереопар знімків або імпортованих з інших джерел, наприклад файли DEM, що надаються службою Геологічної зйомки США-USGS).

Дані координатної прив’язки зазвичай зберігаються в заголовку файлу зображення, який може бути початком запису файлу, або подаватись окремим файлом. Як відомо, в растрових ГІС використовуються дві основні системи координат:

– растрові (або файлові) координати, що показують місце розташування пікселя (орієнтацію пікселя) в межах зображення або файлу даних;

– прямокутні або географічні координати – місце пікселя на карті.

Прямокутні координати визначають місце пікселів в упорядкованій сітці рядків і стовпців. Вони виражаються або в номерах рядків і стовпців, або в плоских координатах (*X, Y*), де координата *X* відповідає номеру стовпця сітки, а *Y* – рядка (рис. 12.3).

Як правило, координати (*0, 0*) у першому випадку має піксель у лівому верхньому куті зображення, в другому – це піксель у лівому нижньому куті, а значення координат інших пікселів визначають з урахуванням розміру пікселя (просторового розрізнення).

Географічні або прямокутні координати задають положення пікселів або в значеннях географічних координат (широта $\varphi_г$, довгота $\lambda_г$), або в плоскій системі координат карти заданої проєкції.

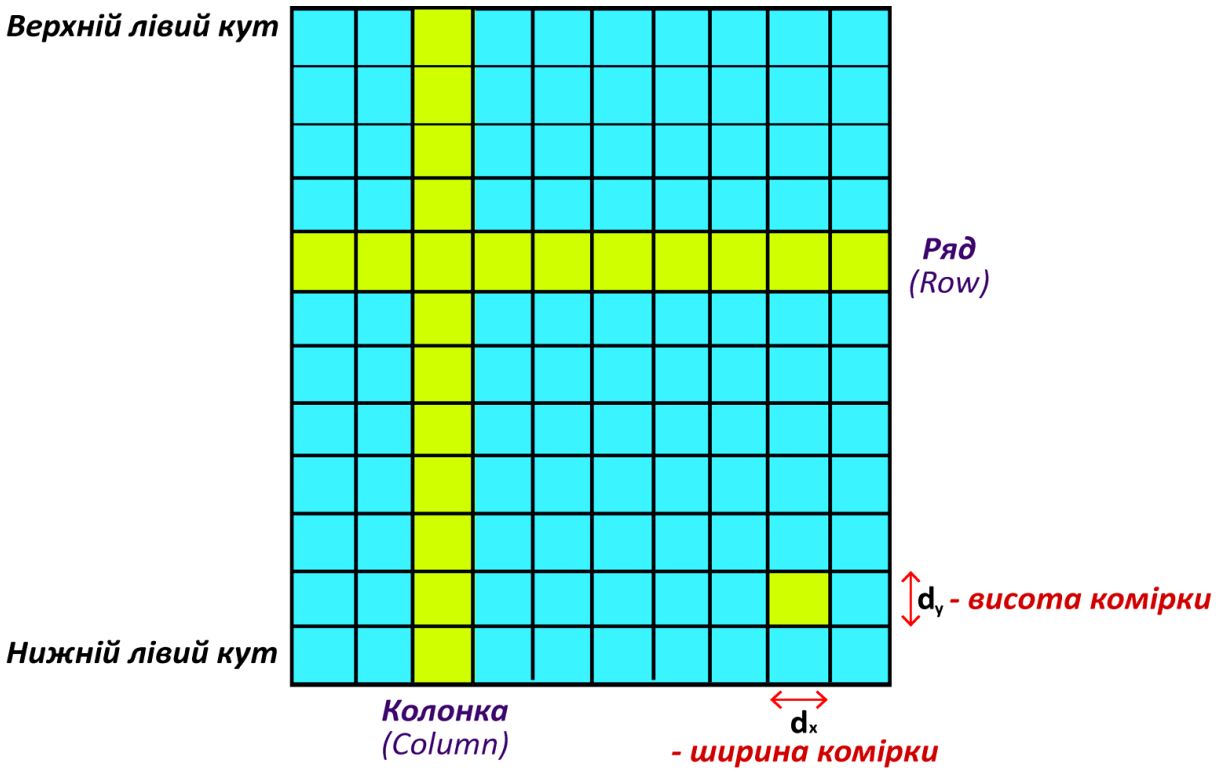


Рис. 12.3. *Растрові координати пікселя*

Тип використовуваних координат визначається способом формування файлу (дистанційне зондування, сканування існуючої карти тощо). Часто супутникові знімки в пунктах прийому й обробки супроводжуються інформацією про географічні координати кутів кадрів знімків. Систему координат файлу зображення можна перетворити на систему координат обраної карти шляхом трансформування програмними засобами ГІС, тобто отримати геокодовані дані.

Растрові шари бувають двох типів: *безперервні* (continuous) і *тематичні* (thematic).

Безперервні шари – це матриці пікселів, значеннями яких є дійсні числа – результати вимірів або розрахунків. Тобто по кожній ділянці земної поверхні, що відображається пікселем, зіставляється певна чисельна характеристика. Якщо шар являє собою це знімок з будь-якої зони спектра, то *чисельна характеристика – це нормована до певної шкали яскравість об'єкта в даній зоні спектра*. Дані в таких шарах можуть бути різних форматів, що допускаються в комп'ютері для подання чисельних даних.

Тематичні шари – це растрові тематичні карти, де значення кожного пікселя – це ідентифікатор певного класу об'єктів земної поверхні, тобто ціле число. Наприклад: 1 – вода, 2 – орні землі, 3 – чагарники тощо. Дешифрування ідентифікаторів класів може бути описане в таблиці атрибутів тематичного шару.

Відповідно до особливостей організації цих двох типів зображень, існують операції, які можна виконувати тільки над безперервними і тільки над тематичними шарами.

12.1.2. Векторна форма збереження цифрового зображення

Векторна форма збереження цифрового зображення, на відміну від растрової, вміщує описи всіх елементів зображення, що використовуються програмою візуалізації.

Векторний файл цифрового зображення – це набір незалежних від пристроїв відображення математичних описів графічних фігур (геометричних примітивів), за якими щоразу вираховуються всі точки контуру зображення об'єкта.

Векторна форма збереження цифрового зображення є економною з точки зору необхідних обсягів пам'яті, оскільки зберігає не саме зображення, а основні дані, за якими відповідна програма щоразу його відновлює. Об'єкти векторної форми легко трансформуються, ними нескладно маніпулювати практично без впливу на якість зображення. Вони максимально використовують можливості розрізненності будь-яких пристроїв виведення іконічної інформації.

Векторні формати збереження цифрового зображення суттєво відрізняються один від одного, оскільки кожен з них проєктується для конкретних цілей і використовує різні математичні моделі одних і тих же об'єктів та потребує при використанні різних алгоритмів. З іншого боку, більшість пристроїв уведення-виведення підтримують сітку з пікселів, кожний з яких адресується окремо. Завдяки цьому програма завжди може знайти спосіб відобразити елементи зображення у векторному форматі. Незважаючи на значні відмінності векторних форматів файлів, вони мають визначену базову структуру: заголовок, розділ даних та маркер кінця файлу.

Розмір файлу векторного формату прямо пропорційний кількості відображуваних об'єктів. Це специфічна особливість, оскільки розмір растрового файлу не залежить від складності описаного в ньому зображення (на нього може вплинути лише спосіб ущільнення даних). Векторні формати, на відміну від растрових, не підтримують ущільнення даних. Але деякі векторні формати припускають альтернативний метод кодування і таким чином дозволяють зменшувати обсяг файлів, не зменшуючи інформації, що в них зберігається.

Масштабування, повороти й інші маніпуляції з векторними зображеннями здійснюються набагато простіше на відміну від растрових. Крім того, оскільки масштабування простіше, то векторні файли не обмежують розмір зображення.

До переваг векторних файлів відносять:

– *зручність збереження зображень*, що складаються з графічних примітивів. Більш складні векторні формати дозволяють зберігати тривимірні об'єкти, такі як багатогранники та каркасні моделі;

– *легкість масштабування та придатність до різних маніпуляцій*, що дозволяє їх адаптування до розрізненності будь-яких пристроїв виведення інформації;

– *легкість модифікування векторних файлів у форматі ASCII* за допомогою простих засобів редагування тексту;

– *легкість візуалізації з наступним збереженням* у цьому форматі або у будь-якому іншому.

До недоліків векторних форматів відносять:

• важкість використання для збереження складних зображень, наприклад, аеро- та супутникових знімків, кольорова палітра яких є дуже важливою і може змінюватись на рівні пікселів;

• зміну зовнішнього подання векторних зображень залежно від програми, що їх створює. На цей процес впливають такі фактори, як сумісність програми візуалізації з програмою, що створила зображення, і складність набору геометричних примітивів та операцій малювання;

• залежність відображення від пристроїв виведення (векторні дані краще відображаються на векторних пристроях виведення, таких як плоттери та дисплеї з довільним скануванням). Векторну графіку можна ефективно відобразити лише на растрових дисплеях із високим розрізненням;

• відносно висока залежність візуалізації, оскільки кожен елемент зображення має бути відтворений окремо й у визначеній послідовності.

Растрова форма просторових даних прийнятна для створення фотореалістичних зображень із плавними переходами кольорів, а векторна – для відображення об’єктів з чіткими межами та ясними деталями.

Крім растрових і векторних форматів файлів, є й інші, серед яких виділяють *метафайли* – віртуальні структури, що містять імена (адреси) субфайлів. Субфайли можуть бути як векторного, так і растрового формату.

Таким чином, залежно від характеру матеріалу та сфери його використання потрібно вибирати, в якому вигляді (форматі) буде зберігатися та чи інша графічна інформація.

12.2. Методи стиснення цифрових даних супутникової зйомки

Об’єм інформації однієї сцени сучасного супутникового цифрового знімка високого просторового розрізнення може досягати декількох гігабайт, а це створює проблеми економії пам’яті, а під час передавання цифровими каналами з обмеженою перепускною здатністю – проблеми зайнятості каналу.

Вирішення вказаних проблем можливе методами компресії ("упакування", "стиснення", "архівації", "ущільнення") цифрових знімків – перетворення, спрямованого на ущільнення (зменшення об’єму) інформації. Відновлення стиснутого первинного зображення здійснюється його *декомпресією* ("розпакуванням").

Стиснення даних (англ. *data compression*) ***– це процедура перекодування даних, яка проводиться з метою зменшення їхнього обсягу, розміру, об’єму.***

Стиснення дозволяє зменшити навантаження на канали передачі даних або зменшити обсяг, який займають дані за рахунок їх обробки та перетворення.

Теорія інформації стверджує, що інформації у повідомленні тим більше, чим менше його ентропія. Для будь-якої системи кодування можна оцінити її максимальну інформаційну ємність (H_{max}) і дійсну ентропію (H). Тоді надлишковість дорівнює:

$$R = \frac{H_{\max} - H}{H_{\max}}.$$

Вимір надлишковості природних мов (якими людина розмовляє) дає приголомшливі результати: надлишковість цих мов становить близько 80 %, а це свідчить про те, що майже 80 % інформації, що передається за допомогою мови, є надлишковою (зайвою). Цікавим є і той факт, що показники надлишковості різних мов дуже близькі.

Для наочності розглянемо приклад: телефонний номер 233 34 44. Відповідно запис "*Двсті трцать три трицть чотри сорк чтри*", у якій є не один, а декілька пропущених символів, як і раніше, легко читається. Це пов'язано з тим, що наша мова має певну надлишковість, яка, з одного боку, збільшує довжину запису, а з іншого – підвищує надійність її передачі. Пояснюється це тим, що імовірність появи кожного наступного символа у цифровому запису телефону однакова, в той час як у тексті, записаному словами української мови, це не так. Дійсно, наприклад, що буква "*щ*" в українській мові з'являється значно менше, ніж, наприклад, буква "*а*". Більш того, деякі сполучення букв є більш ймовірні, ніж інші, а такі, як дві літери щщ підряд, неможливі в принципі тощо. Знаючи ймовірність появи будь-якої літери в тексті і порівнявши її з максимальною, можна встановити, наскільки економний даний спосіб кодування (у нашому випадку – української мови).

Факт надлишковості свідчить про можливість переходу на іншу систему кодування, яка б дозволяла зменшувати надлишковість повідомлення, що передається. Ведучи мову про перехід на коди, які дозволяють зменшити розмір повідомлення, вводять поняття "коди стиснення". Власне, кодування інформації може переслідувати різні цілі:

– кодування з метою стиснення повідомлення (коди стиснення);

– кодування з метою збільшення завадостійкості (завадостійкі коди);

– криптографічне кодування (криптографічні коди).

Ведучи мову про коди стиснення, розрізняють поняття "стиснення без втрат" і "стиснення з втратами".

Стиснення з втратами використовується головним чином для графіки (JPEG), звуку (MP3), відео (MPEG), тобто там, де через величезні розміри файлів ступінь стиснення є дуже важливим і можна пожертвувати деталями, не істотними для сприйняття цієї інформації людиною. У низці випадків стиснення графіки з втратами, забезпечуючи дуже високі ступені компресії, практично непомітні для людини.

Проте методи стиснення з втратами мають і низку недоліків. Перший полягає в тому, що компресія з втратами може використовуватись не для всіх випадків аналізу графічної інформації. У разі машинних методів аналізу графічної інформації результати кодування з втратою (непомітні для ока людини) можуть бути "помітними" для машинного аналізатора. Другий полягає в тому, що повторна компресія і декомпресія з втратами приводять до ефекту накопичення похибок.

Стиснення без втрат, або кодування без втрат, може застосовуватись для стиснення будь-якої інформації, оскільки забезпечує абсолютно точне відновлення даних після кодування і декодування. Стиснення без втрат засновано на простому принципі перетворення даних з однієї групи символів на іншу, більш компактну.

Обидва підходи забезпечують зменшення надлишкової інформації у вхідних даних.

12.2.1. Стиснення статичних зображень із втратами інформації

Стиснення з втратами (англ. *Lossy compression*) ***– метод стиснення даних, при якому розпакований файл відрізняється від оригіналу, проте є корисним для використання.***

Алгоритми стиснення з втратами оперують з коефіцієнтами в середньому 10–200. Крім можливості модифікації зображення, одна з основних причин подібної різниці полягає в тому, що традиційні алгоритми орієнтовані на роботу з ланцюжком. Вони не враховують "когерентність зон" у зображеннях, що полягає в малій зміні кольору й структури на невеликій ділянці зображення.

Алгоритм JPEG (англ. *Joint Photographic Expert Group* – Об'єднана експертна група з фотографії) – один із найпоширеніших методів стиснення обсягів інформації кольорових дискретних зображень. Практично він є стандартом для повнокольорових зображень. Оперує алгоритм ділянками 8x8, на яких яскравість і колір змінюються порівняно плавно. Внаслідок цього при розкладанні матриці такої ділянки в подвійний ряд по косинусах значущими виявляються тільки перші коефіцієнти. Стиснення в JPEG здійснюється за рахунок плавності зміни кольорів ву зображенні.

Алгоритм заснований на дискретно-косинусному перетворенні (ДКП), що застосовується до матриці зображення для отримання нової матриці коефіцієнтів. Для отримання попереднього зображення використовується зворотне перетворення.

ДКП розкладає зображення по амплітудах деяких частот. Таким чином, при перетворенні отримуємо матрицю, в якій або багато коефіцієнтів, близьких до нуля, або які дорівнюють нулю. Крім того, завдяки недосконалості людського зору можна апроксимувати коефіцієнти грубіше без помітної втрати якості зображення. Для цього використовується квантування коефіцієнтів. У найпростішому випадку – це арифметично побітовий зсув праворуч. При цьому перетворенні втрачається частина інформації, але можуть досягатися високі коефіцієнти стиснення. Процес відновлення зображення в цьому алгоритмі повністю симетричний. Метод дозволяє стискати деякі зображення в 10–15 разів без серйозних втрат.

Переваги: задається ступінь стиснення; вихідне кольорове зображення може мати 24 біти на точку.

Недоліки: при підвищенні ступеня стиснення зображення розпадається на окремі квадрати (8x8). Це пов'язане з тим, що відбуваються більші втрати в низьких частотах при квантуванні відновити вихідні дані стає неможливо. Проявляється ефект Гіббса – ореоли на межах різких переходів кольорів.

Алгоритм JPEG. Коефіцієнти компресії: 2–200 (задається користувачем). Клас зображень: повнокольорові 24-бітні зображення або зображення в градаціях сірого без різких переходів кольорів (фотографії). Симетричність: 1.

Фрактальний алгоритм – це алгоритм стиснення зображень із втратами, заснований на застосуванні систем ітерованих функцій до зображень. Даний алгоритм відомий тим, що в деяких випадках дозволяє одержати дуже високі коефіцієнти стиснення (кращі приклади – до 1000 разів за прийнятної візуальної якості)

для реальних фотографій природних об’єктів, що недоступно для інших алгоритмів стиснення зображень у принципі. Через складну ситуацію з патентуванням широкого поширення алгоритм не набув.

Основа методу фрактального кодування – це виявлення самоподібних ділянок у зображенні. Метод використовує системи доменних і рангових блоків зображення, блоків квадратної форми, що покривають все зображення. Цей підхід став основою для більшості методів фрактального кодування, застосовуваних сьогодні. Відповідно до даного методу зображення розбивається на безліч неперекритих рангових підзображень і визначається безліч неперекритих доменних підзображень. Для кожного рангового блоку алгоритм кодування знаходить найбільш придатний доменний блок і афінне перетворення, що переводить цей доменний блок у даний ранговий блок. Структура зображення відображається в систему рангових блоків, доменних блоків і перетворень.

Основна складність фрактального стиснення полягає в тому, що для знаходження відповідних доменних блоків потрібен повний перебір. Оскільки при цьому переборі щоразу повинні порівнюватися два масиви, дана операція виходить досить тривалою. Порівняно простим перетворенням її можна звести до операції скалярного добутку двох масивів, однак ця операція також тривала.

Характеристики фрактального алгоритму. Коефіцієнти компресії: 2–2000. Клас зображень: повнокольорові 24-бітні зображення або зображення в межах сірого без різких переходів кольорів. Бажано, щоб ділянки більшої значущості були більш контрастними й різкими, а ділянки меншої значущості – неконтрастними й розмитими. Симетричність: 100–100000. Характерні риси: може вільно масштабувати зображення при розархівуванні, збільшуючи його в 2–4 рази без появи "сходового ефекту".

При збільшенні ступеня компресії з’являється "блоковий" ефект на межах блоків у зображенні [112].

Рекурсивний (хвильовий) алгоритм (wavelet) – орієнтований на кольорові й чорно-білі зображення із плавними переходами. Ідеальний для картинок типу рентгенівських знімків. Коефіцієнт стиснення задається й варіюється в межах 5–100. При спробі задати більший коефіцієнт на різких границях, що особливо проходять по діагоналі, проявляється "сходовий ефект".

Сутність алгоритму полягає в тому, що у файлі зберігається різниця – число між середніми значеннями сусідніх блоків у зображенні, що зазвичай набуває значення, близького до 0.

Вейвлетна компресія в сучасних алгоритмах компресії зображень дозволяє значно (до двох разів) підвищити ступінь стиснення чорно-білих і кольорових зображень порівняно з візуальною якістю алгоритмів попереднього покоління, заснованих на дискретному косинусному перетворенні, таких, наприклад, як JPEG. Для роботи з дискретними зображеннями використовується варіант вейвлет-перетворення, відомий як алгоритм Малла. Вихідне зображення розкладається на дві складові – високочастотні деталі (що складаються в основному з різких перепадів яскравості), і згладжену зменшену версію оригіналу. Це досягається застосуванням пари фільтрів, причому кожна з отриманих складових

удвічі менша за вихідне зображення. Як правило, використовуються фільтри з кінцевим імпульсним відгуком, у яких пікселі, що потрапили в невелике "вікно", множаться на заданий набір коефіцієнтів, отримані значення підсумовуються, і вікно зсувається для розрахунку наступного значення на виході. Між вейвлетами й фільтрами є тісний зв'язок. Вейвлети безпосередньо не фігурують в алгоритмах, але якщо ітерувати відповідні фільтри на зображеннях, що складаються з єдиної яскравої точки, то на виході будуть все чіткіше проявлятися вейвлети.

Оскільки зображення двовимірні, фільтрація здійснюється і по вертикалі, і по горизонталі. Цей процес повторюється багаторазово, причому щоразу як вхід використовується згладжена версія з попереднього кроку, тому що зображення "деталей" складаються зазвичай з набору різких границь і містять великі ділянки, де інтенсивність близька до нуля.

Якщо зневажити деякою кількістю дрібних деталей, то всі ці значення можна просто обнулити. В результаті виходить версія вихідного зображення, що добре піддається стисненню. Для відновлення оригіналу знову застосовується алгоритм Малла, але з парою фільтрів, зворотною до вихідного.

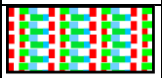
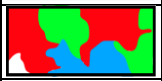
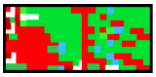
Характеристики хвильового алгоритму. Коефіцієнти компресії: 2–200. Клас зображень: як у фрактальному і JPEG. Симетричність: 1,5. Характерні риси: при високому ступені стиснення зображення розпадається на окремі блоки.

Аналіз методів стиснення зображень зведено у табл. 12.1.

Проведемо оцінку методів стиснення без втрат (без CCITT, як частково-комерційне рішення) на якість і швидкість стиснення. Для цього використовувався тестовий набір повнокольорових і монохромних зображень у форматі BMP 24bit. У табл. 12.2 наведено загальні значення.

Таблиця 12.1

Методи стиснення зображень

Алгоритм	За рахунок чого відбувається стиснення	Ілюстрація	Тип
RLE	Послідовне повторювання однакових значень кольорів		Безвтратний
LZW	Повторювані однотипні послідовності кольорів		Безвтратний
Хаффмана	Різна частота появи кольорів у зображенні		Безвтратний
DEFLATE	За рахунок різної частоти Поява пікселів у зображенні та їх однотипних рядків		Безвтратний
CCITT-3	Монохромні зображення з повторюваними елементами		Безвтратний
Wavelet	Поступові переходи кольорів		З втратами
JPEG	Відсутність різких границь		З втратами
Фрак-тальний	Самонагадування елементів зображень		З втратами

Таблиця 12.2

Оцінка методів безвтратного стиснення

Алгоритм	Середній коефіцієнт	Швидкість
LZW	2,94	89 %
Хаффман	1,49	73 %
RLE	2,12	100 %
DEFLATE	3,45	81 %

З табл. 12.2 чітко видно, що оптимальним із розглянутих алгоритмів за співвідношенням *якість–втрати* є алгоритм DEFLATE. Тому доцільно розробити новий підхід до стиснення зображень на основі методу DEFLATE з використанням етапу попередньої обробки. На цьому етапі повинні підготуватися дані, які по-перше, мають повторювані фрагменти, по-друге, мають велику кількість однакових пікселів на зображенні.

Етап попередньої обробки може включати наступні основні алгоритми: визначення кольору фону; визначення наявності зображення; аналіз можливості відділення фрагментів зображення; доведення фрагментів до прямокутної форми; безпосередня обробка фрагментів зображення. Додатково збільшити коефіцієнт стиснення можливо за рахунок вибору кольорової моделі.

Оскільки алгоритм DEFLATE стискає за рахунок різної частоти появи пікселів у зображенні, то доцільно використовувати кольорорізницеву модель, у якій у двох кольорових компонентів знижений динамічний діапазон даних для фрагментів зображення з однотипними рядками [49; 112].

12.2.2. Стиснення статичних зображень без втрат інформації

У растрових файлах повинна зберігатися інформація про кожний піксель зображення. Однак, якщо просто записувати інформацію про кожний піксель, файл може виявитися дуже великим. Тому в більшості форматів графічних файлів передбачені засоби стиснення: спеціальні математичні алгоритми, які дозволяють записувати інформацію про зображення за допомогою меншої кількості байтів.

Стиснення без втрат (англ. *lossless*) – ***метод стиснення даних, при використанні якого закодована інформація може бути відновлена з точністю до біта.***

Зазвичай стиснення здійснюється за рахунок видалення її надлишковості. Джерелом надлишковості інформації зображень є високий ступінь їх однорідності на окремих малих ділянках. Стисненням зображень без втрат інформації можна зменшити її об’єм у декілька разів, а стисненням із втратами – в десятки, то й сотні разів [112].

Алгоритм RLE *(Run Length Encoding – групове кодування або послідовне стиснення)* – один із найстаріших і найпростіших алгоритмів стиснення статичних зображень без втрат інформації. Зображення в ньому витягується в ланцюжок байтів по рядках растру. Саме стиснення в RLE відбувається за рахунок того, що у вихідному зображенні зустрічаються *ланцюжки однакових байт*. Алгоритм орієнтований на зображення з невеликою кількістю кольорів. До позитивних сторін алгоритму можна віднести тільки те, що він не вимагає додаткової пам’яті при архівації та розархівації, а також швидко працює.

За цим методом серії величин яскравості пікселів, що повторюються, замінюються однією величиною з вказівкою числа повторень ("*лічильник повторів значення яскравості*"). Наприклад, рядок яскравостей зображення має вигляд *deeeffffbbccccccccaaar*. За методом групового кодування він може бути

записаним у такому вигляді: *1df3e5f2b8c3a1r*. Метод групового кодування легко реалізується й дає гарні результати стиснення, якщо зображення має значні ділянки з однаковими яскравістю або кольором [130; 50].

Якщо зображення містить яскравості або кольори, що незначно відрізняються, то для компресії інформації може використовуватись різницеве (наприклад, відмінність від попереднього) кодування інтенсивності. Використання різницевого (диференціального) квантування інтенсивності сигналів також зменшує об'єм інформації, оскільки різниці мають менший діапазон.

Характеристики алгоритму RLE. Коефіцієнти компресії: від 32 до 0,5. Клас зображень: орієнтований алгоритм на зображення з невеликою кількістю кольорів, тобто на ділову й наукову графіку. Симетричність: приблизно одиниця. Характерні риси: не вимагає додаткової пам'яті при пакуванні і розпаковуванні, а також швидко працює. Цікава особливість групового кодування полягає в тому, що ступінь архівації для деяких зображень може бути істотно підвищений лише за рахунок зміни порядку кольорів у палітрі зображення [50].

Алгоритм LZ. Існує досить велике сімейство LZ-подібних алгоритмів, що розрізняються, наприклад, методом пошуку повторюваних ланцюжків.

Один із досить простих варіантів цього алгоритму припускає, що у вхідному потоці ідуть або пари <лічильник, зсув щодо поточної позиції>, або просто <лічильник> "пропуску" байт і самі значення байтів.

При розпакуванні для пари <лічильник, зсув> копіюються <лічильник> байт із вихідного масиву, отриманого в результаті розпакування, на <зсув> байт раніше, а <лічильник> (тобто число, що дорівнює лічильнику) значень "пропуску" байт просто копіюються у вихідний масив із вхідного потоку.

Даний алгоритм є несиметричним за часом, оскільки вимагає повного перебору буфера у пошуку однакових ланок. У результаті нам складно задати великий буфер через різке зростання часу компресії. Однак потенційна побудова алгоритму, у якому на <лічильник> і на <зсув> буде виділено по 2 байти (старший біт старшого байта лічильника – ознака повтору рядка / копіювання потоку), дає можливість стискати всі повторювані ланки рядка розміром до 32 Кб у буфері розміром 64 Кб. При цьому можна отримати збільшення розміру файлу в найгіршому варіанті на 32770/32768 (у двох байтах записано, що потрібно переписати у вихідний потік наступний 215 байт). Максимальний коефіцієнт стиснення досягає межі 8192, оскільки максимальне стиснення ми одержуємо, перетворюючи 32 Кб буфера на 4 байти, а буфер такого розміру ми отримуємо не відразу. Однак мінімальна ланка рядка, для якої нам вигідно проводити стиснення, повинна складатися в загальному випадку мінімум з 5 байт, що й визначає малу цінність даного алгоритму. До достоїнств LZ можна віднести надзвичайну простоту алгоритму декомпресії [50].

Алгоритм LZW свою назву отримав за першими літерами прізвищ його розробників – Lempel, Ziv і Welch. Стиснення в ньому, на відміну від RLE, здійснюється за рахунок *однакових ланцюжків байт*. Процес стиснення виглядає досить просто. Ми зчитуємо послідовно символи вхідного потоку і перевіряємо,

чи є у створеній нами таблиці рядків такий рядок. Якщо рядок є, то ми зчитуємо наступний символ, а якщо рядка немає, то ми заносимо в потік код для попереднього знайденого рядка, заносимо рядок в таблицю і починаємо пошук знову. *Алгоритм LZW* орієнтований на 8-бітові зображення. *LZW* є універсальним алгоритмом – саме його варіанти використовуються у звичайних архіваторах.

Характеристики алгоритму LZW. Коефіцієнти компресії: від 1000 до 5/7. Стиснення в 1000 разів досягається тільки на одноколірних зображеннях розміром кратним приблизно 7 Мб. Клас зображень: 8-бітні зображення, побудовані на комп'ютері. Стискає за рахунок однакових ланок у потоці. Симетричність: майже симетрична, за умови оптимальної реалізації операції пошуку рядка в таблиці. Характерні риси: ситуація, коли алгоритм збільшує зображення, зустрічається вкрай рідко. Алгоритм LZW універсальний – саме його варіанти використовуються у звичайних архіваторах.

Класичний алгоритм Хаффмана – один з алгоритмів, відомий ще з 60-х рр. XX ст. Використовує тільки частоту появи однакових байтів у зображенні. Порівнює символи вхідного потоку, які найчастіше зустрічаються і мають ланцюжок біт меншої довжини. І навпаки, що зустрічається рідко, – ланцюжок більшої довжини. Для збору статистики вимагає двох проходів по зображенню.

Класичний алгоритм Хаффмана вимагає запису у файл таблиці відповідності символів, що кодуються, і ланцюжків, що кодують.

На практиці використовуються його різновиди.

Так, у деяких випадках резонно або використовувати постійну таблицю, або будувати її "адаптивною", тобто в процесі пакування / розпакування. Ці прийоми рятують нас від двох проходів по зображенню й необхідності зберігання таблиці разом з файлом.

Кодування з фіксованою таблицею застосовується як останній етап архівації в JPEG і в розглянутому нижче алгоритмі CCITT Group 3.

Характеристики класичного алгоритму Хаффмана. Коефіцієнти компресії: від 8 до 1. Клас зображень: практично не застосовується до зображень у чистому вигляді. Зазвичай використовується як один з етапів компресії в більш складних схемах. Симетричність: 2 (за рахунок того, що вимагає двох проходів по масиву стиснених даних). Характерні риси – єдиний алгоритм, що не збільшує розміру вихідних даних.

Алгоритм Хаффмана з фіксованою таблицею CCITT Group 3. Близька модифікація алгоритму використовується при стисненні чорно-білих зображень (один біт на піксель). Послідовності чорних і білих точок, що йдуть одна за одною, в ньому замінюються числом, яке дорівнює їхній кількості, які, в свою чергу, стискуються за Хаффманом з фіксованою таблицею. Алгоритм реалізований у форматі TIFF.

Характеристики алгоритму CCITT Group 3. Коефіцієнти компресії: від 213 до збільшення файлу в 5 разів. Клас зображень: двокольорові чорно-білі зображення, в яких переважають більші простори, заповнені білим кольором.

Симетричність: близька до 1. Характерні риси: даний алгоритм надзвичайно простий у реалізації, швидкий і може бути легко реалізований апаратно [50].

Алгоритм JBIG розроблений групою експертів ISO спеціально для стиснення однобітних чорно-білих зображень. Може застосовуватися до 2, 4 бітових картинок. При цьому алгоритм розбиває їх на окремі бітові площини. JBIG дозволяє управляти такими параметрами, як порядок розбивки зображення на бітові площини, ширина смуг у зображенні, рівні масштабування. Остання можливість дозволяє легко орієнтуватися в базі більших за розмірами зображень, переглядаючи спочатку їхні зменшені копії. Розпаковуватися зображення на екрані буде поступово, ніби повільно "проявляючись".

Алгоритм Lossless JPEG розроблений групою експертів в галузі фотографії. На відміну від JBIG, Lossless JPEG орієнтований на повнокольорові 24- або 8-бітні в градаціях сірого зображення без палітри. Він є спеціальною реалізацією JPEG без втрат. Коефіцієнти стиснення: від 20 до 1. Lossless JPEG рекомендується застосовувати в тих додатках, де необхідна побітова відповідність вихідного й декомпресованого зображень.

Алгоритм DEFLATE – це алгоритм, що використовує комбінацію алгоритму LZ і алгоритму Хаффмана. Цей метод кодування використовує принцип ковзного вікна і враховує ту інформацію, що раніше зустрічалася, тобто інформація, що вже відома для кодувальника й декодувальника (друге й наступне входження деякого рядка символів у повідомленні заміняються посиланнями на її перше входження).

Ковзне вікно можна подати у вигляді буфера або більш складної динамічної структури даних. Таким чином, сам процес стискувального кодування, згідно з LZ, нагадує написання програми, команди якої дозволяють звертатися до елементів "ковзного вікна" і замість значень стисненої послідовності вставляти посилання на ці значення в "ковзному вікні". Розмір ковзного вікна може динамічно змінюватися й становити 2, 4 або 32 КБ. Слід також зазначити, що розмір вікна кодувальника може бути меншим або дорівнювати розміру вікна декодувальника, але не навпаки.

Характеристики алгоритму DEFLATE. Коефіцієнти компресії: від 1000 до 1/3. Клас зображень: будь-які зображення, бажано з великими одноколірними ланцюжками. Симетричність: близька до 1. Характерні риси: достатньо простий у реалізації, швидкий, широко використовується в програмному забезпеченні. Недоліком алгоритму є мала ефективність при кодуванні незначного обсягу даних.

Наведені вище алгоритми досить універсальні й покривають усі типи зображень, з іншого боку – в них на сьогодні занадто малий коефіцієнт архівації.

Використовуючи один з алгоритмів стиснення без втрат, можна забезпечити архівацію зображення приблизно у два рази, хоча це і багато в чому залежить від самого зображення, його насиченості, кількості кольорів, складності зображення тощо.

12.3. Формати запису матеріалів супутникової зйомки

Сцена супутникового знімка в растровому файлі містить заголовок, растрові дані та іншу інформацію. Загальноприйнята або стандартизована система розміщення цифрової інформації у файлі, що забезпечує обмін даними між програмами, операційними системами, окремими електронними обчислювальними машинами, називається *форматом запису*. Комп'ютер розпізнає формат запису файлу знімка за ідентифікатором формату, з якого починається заголовок файлу, що не є зображенням, й містить допоміжні дані, які складають:

– опис файлів даних (формат запису, процедура стискання, структура тому, опис даних усіх томів, опис кожного тому, розташування, вид, розмір кожного файлу тому, кількість записів, довжина запису, позиція даних, пояснення даних у файлі);

– опис сцени зйомки (положення центра, час зйомки, метод і рівень корекції зображення, картографічна проєкція, кількість томів тощо);

– опис параметрів зображення (кількість рядків і стовпців, спектральне й просторове розрізнення, статистичні характеристики розподілення яскравості, якість даних тощо);

– опис носія знімальної апаратури (параметри орбіти, положення й орієнтація бортової системи координат на момент зйомки, надир);

– опис знімальної апаратури (параметри датчика, метод проєктування та інші дані, зокрема телеметрія).

З метою уніфікації процесу автоматизованої обробки супутникових знімків цифрові дані, формати їх видачі, як і рівні обробки, стандартизуються. Низка систем ДЗЗ мають власні формати даних (Landsat, SPOT, IRS, OrbView, Iconos та ін.). Деякі формати стали всесвітньо відомими й одержали статус міжнародних стандартів. У світі добре відомі формати APT і HRPT видачі інформації від американських метеорологічних супутників серії NOAA, які, власне, стали міжнародними стандартами.

Цифрові дані, наприклад багатоспектральні дані сканера, для спрощення комп'ютерного аналізу перетворюються із HDDT (англ. High Density Digital Tape – цифрова стрічка високої щільності) на CCT (англ. Computer Compatible Tape – стрічка, сумісна з комп'ютером).

На рис. 12.4 наведено схеми структур файлів упорядкованих растрових даних зображень спектральних зон у форматах BSQ, BIL й BIP [18]:

– **BSQ** (англ. Band Sequential) – канали записуються як послідовності окремих зображень (рис. 12.4, *а*);

– **BIL** (англ. Band Interleaved by Line) – кожен рядок зображення записується у вигляді послідовності рядків по всіх каналах (рис. 12.4, *б*);

– **BIP** (англ. Band Interleaved by Pixel) – кожен піксель зображення записується у вигляді послідовності пікселів по всіх каналах (рис. 12.4, *в*).

У BSQ-форматі кожний спектрозональний знімок міститься в окремому файлі (рис. 12.4, *а*). Це зручно, коли немає потреби працювати одразу з усіма зонами, одну зону легко прочитати й візуалізувати, зональні знімки можна завантажувати за бажанням у будь-якому порядку.

У BIL-форматі зональні дані записуються в один файл рядок за рядком, при цьому зони слідують по черзі за рядками: 1-й рядок 1-ї зони, 1-й рядок 2-ї зони, 1-й рядок 3-ї зони, .., 2-й рядок 1-ї зони, 2-й рядок 2-ї зони, 2-й рядок 3-ї зони тощо. (рис. 12.4, *б*). Такий запис зручний, коли виконується аналіз знімків одночасно всіх спектральних зон.

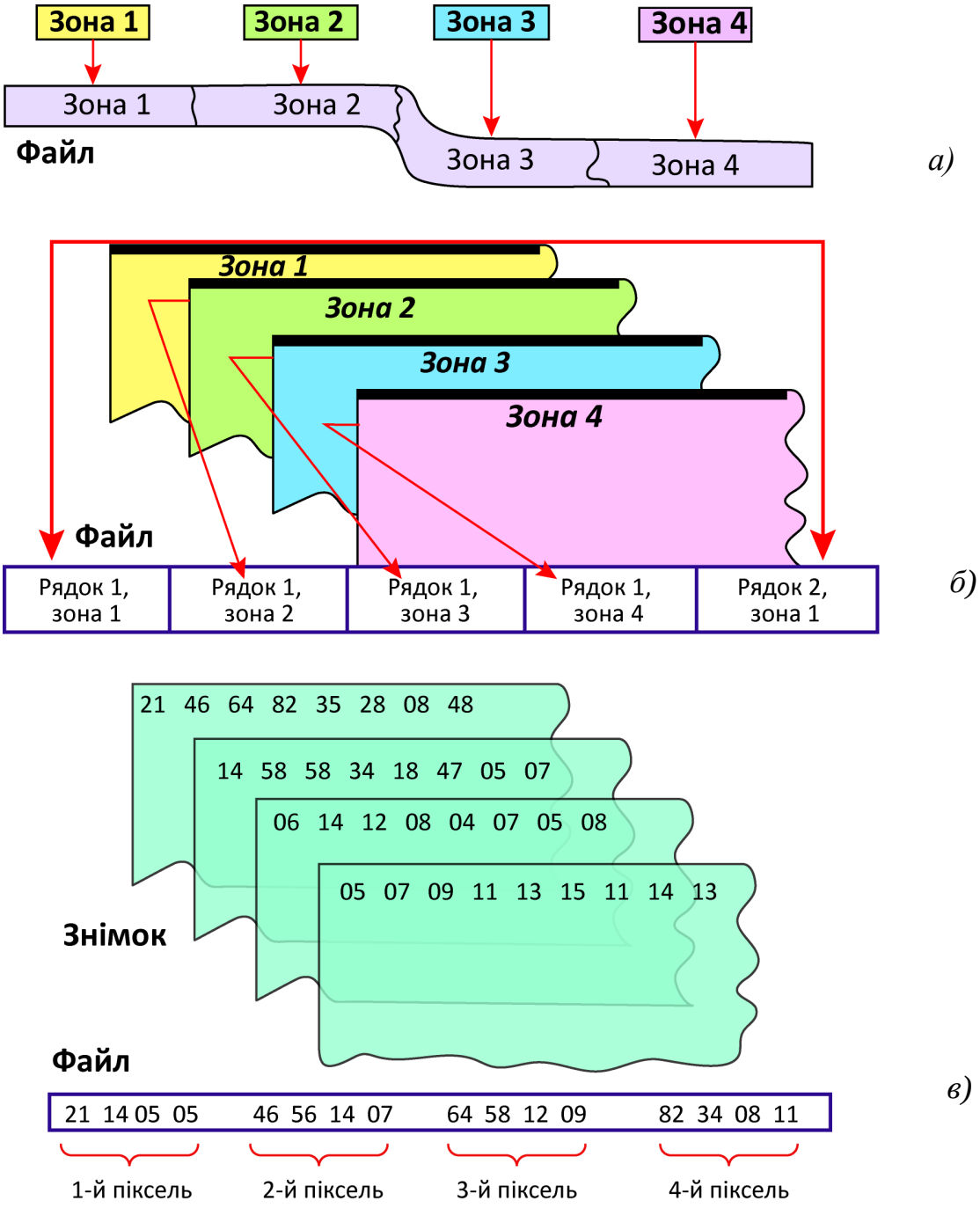


Рис. 12.4. *Формати збереження даних: а) послідовність зон (BSQ); б) зони, що формуються по рядках (BIL); в) зони, що формуються по пікселях (BIP)*

У BIP-форматі зональні значення яскравості кожного пікселя зберігаються послідовно (рис. 12.4, *в*). Формат заснований на попіксельному способі запису інформації, при якому пікселі з однаковим номером, що відповідає різним

каналам зйомки, розташовуються в запису підряд. Такий спосіб називається *суміщеним*. Він зручний при виконанні попіксельної обробки багатозонального знімка, наприклад, в алгоритмах класифікації.

Загальну якісну характеристику файлів цифрових зображень растрових форматів PCX, BMP (MS Windows Bitmap), TIEF, GIF, PSD, JPEG та PNG коротко наведено нижче [62; 64; 74; 81; 83].

Формат PCX – перший стандарт збереження графічних растрових файлів у комп'ютерах IBM PC, який згодом був перетворений під операційну систему Windows. Файли PCX розділені на три частини: заголовок PCX, дані растрового масиву й факультативна таблиця кольорів. Кодування кольору кожного пікселя у сучасних зображеннях PCX може проводитися з глибиною 1, 4, 8 або 24 біт, але не підтримує кольорову систему координат CMYK. Формат PCX модифікований для використання в адаптерах VGA й адаптерах істинних кольорів. Він один із найбільш простих форматів растрової графіки для декодування.

Формат BMP (англ. Bitmap Windows – бітова карта Windows) є рідним форматом операційної системи Windows і підтримується усіма графічними редакторами під її керуванням. Він застосовується для збереження растрових зображень, що використовуються у Windows і DOS, та здатен зберігати як індексований (до 256 кольорів), так і RGB-колір (до 224 відтінків). У файлах BMP-формату інформація про колір кожного пікселя може кодуватись 1, 4, 8, 16 або 24 бітами. Файл BMP формату складається із чотирьох основних розділів: заголовок файла растрової графіки, інформаційний заголовок растрового масиву, таблиця кольорів і власне дані растрового масиву. Якщо глибина кольорів 16 або 24 біт, то таблиці кольорів немає. Формати зберігання окремих розділів файла можуть відрізнятись.

Формат TIFF (англ. Tagged Image File Format – формат файлів зображення з тегами (ознаками)) є одним із найпоширеніших (стандартних) і надійних та незалежних від комп'ютерної платформи. Його підтримують усі програми операційної системи Windows і Macintosh, що пов'язані з графікою. Формат TDFF є кращим для імпорту растрової графіки у векторні програми й видавничі системи. Йому доступний увесь діапазон кольорових моделей. Крім традиційних кольорів видавничих систем CMYK, формат TIFF підтримує поділ кольорів з великою кількістю відтінків.

Формат TIFF забезпечує можливість збереження растрових зображень із компресією (LZW-стиснення) без втрати якості. Одночасно формат TIFF є одним із найскладніших. У його специфікації визначено більше 70 різних типів тегів (поміток, ознак). Крім того, файл формату TIFF має обов'язково складатись із послідовності восьмибітових пронумерованих байтів.

Найбільша довжина файла формату TIFF обмежена 232 байтами. Платою за широкі можливості формату TIFF є великі розміри (об'єми) його файлів.

Формат GIF (англ. Graphics Interchange Format – формат обміну графічними даними) незалежний від апаратного забезпечення й призначений для збереження растрових зображень із їх компресією. Цей формат дозволяє записувати зображення "через рядок", завдяки чому можна відтворити зображення із меншого об'єму інформації й гіршим розрізненням.

Структура файлу GIF залежить від версії GIF-специфікації. Для компресії GIF-файлів застосовуються LZW алгоритми. Основними перевагами формату GIF є його компактність, здатність підтримувати прозорість, використання стискання без втрат та економне збереження суцільних ділянок кольору з чіткою межею та кольоровими переходами. Недоліками використання цього формату є обмеження кількості використовуваних кольорів (не більше 256) та складність реалізації ліцензійної угоди.

Формат PSD (англ. PhotoShop Document – документ програми Adobe Photoshop) забезпечує можливість записувати растрове зображення з багатьма шарами, додатковими кольоровими (до 48 біт) каналами та іншою інформацією. Формат PSD використовується програмою Photoshop, але його розуміють і деякі інші програми. Останні версії програм Photoshop здатні записувати файли формату PSD з компресією без помітного погіршення якості зображення.

Формат JPEG (англ. Joint Photographic Experts Group – Об'єднана експертна група з фотографії) базується на аналогічному алгоритмі стискання інформації й призначений для зберігання растрових зображень із великою глибиною кольору (до 24-х біт). Формат JPEG підтримується комп'ютерними платформами PC й Macintosh, але не сумісний з програмами розробки до 1995 р. Завантаження файлу формату JPEG забезпечує появу спочатку грубого зображення (низького розрізнення), яке у міру надходження додаткової інформації поступово покращується. Це дає можливість перервати процес завантаження на будь-якому етапі, що значно економить час огляду мережевих файлів. Формат JPEG використовує алгоритм стиснення інформації з втратами, що забезпечує зменшення об'єму файлу в 10–500 разів порівняно з форматом BMP. Формат JPEG дозволяє регулювати міру стиснення файла, задаючись допустимим спотворенням зображення. Процедура стиснення об'єму інформації складна. Розпаковане зображення у форматі JPEG має незначні відмінності від оригіналу, але при наступних маніпуляціях із розпакованим зображенням вони стають помітними.

Формат PNG (англ. Portable Network Graphic – переносна мережева графіка) наслідував більшість можливостей форматів GIF та JPEG і розроблений для мережі Інтернет. Формат PNG підтримує три типи зображень – кольорові з глибиною 8 або 24 біти і чорно-білі з градацією 256 відтінків сірого. Він здатен підтримувати багаторівневу прозорість, що забезпечує можливість плавного переходу від прозорої ділянки зображення до кольорового. Стиснення інформації здійснюється без втрат. Специфікація формату PNG включає можливості автоматичної корекції кольорів при перенесенні зображень між апаратними платформами і ефектів змінної прозорості.

Векторні дані можуть бути імпортовані в ГІС або отримані шляхом екранного оцифровування зображення за допомогою комп'ютерної "миші". Такий спосіб називають оцифровування за растровою підкладкою. Його використовують із тією ж метою, що й оцифровування за допомогою дигітайзерів, а саме:

а) виділення доріг, водоймищ, меж адміністративних районів;

б) вибору еталонів для класифікації об'єктів;

в) виділення меж ділянок, що становлять інтерес для використання у різних завданнях.

Прикладом векторного формату цифрових зображень є формат WMF (англ. Windows Meta-file). У ньому конвертуються векторні зображення при переносі їх із програми в програму через буфер обміну. Однак форматом WMF потрібно користуватись обережно, оскільки він може спотворити колір і не здатен зберігати низку параметрів об'єктів, які присвоюються різними векторними редакторами. У форматі WMF не можуть зберігатися растрові об'єкти, й він не сприймається більшістю програм платформи Macintosh.

Існує низка інших векторних форматів, як-от: DXF, DGN, CGM, USGS DLG, USGS SDTS, ENVI Vector File та багато інших. На розгляді комітету із стандартів WSC знаходяться два нові векторні стандарти: PGML (англ. Precision Graphics Markup Language – мова точного графічного формату), який підтримується фірмами Adobe Systems, IBM, Netscape й Sun Microsystems, та векторний формат VML (англ. Vector Markup Language – мова векторного формату), що підтримується фірмами Microsoft, Hewlett-Packard, Autodesk, Macromedia й Visio.

Аналогічним формату WMF для комп'ютерної платформи Macintosh є формат PICT. У цьому форматі може бути записана як векторна, так і растрова графіка. Формат PICT розуміють багато графічних програм (наприклад, CorelDRAW) операційної системи Windows. Розмір файлів PICT менший, ніж у багатьох інших форматах. Програми Adobe Premiere та Fractal Design Painter дають можливість завантажувати й зберігати анімаційні та цифрові послідовності у вигляді нумерованих файлів Numbered PICT для подальшого їх використання програмними засобами мультимедіа.

Формат EPS (англ. Encapsulated PostScript) може використовуватись як для растрової, так і для векторної графіки та текстів для опису зображення універсальною мовою PostScript. Для відображення векторного вмісту використовується формат WMF, а растрового – TIFF. У форматі EPS передбачена можливість збереження й виводу на дисплей ескізу (спрощеної версії) зображення. Крім того, формат EPS дозволяв створювати растрове зображення, що обмежується векторним контуром. Майже усі графічні програми можуть писати й читати файли у форматі EPS, тому його основною перевагою є універсальність, яка разом з іншими вказаними можливостями дає привід вважати його стандартним. Однак різні версії формату EPS не повною мірою сумісні. Файли формату EPS можуть бути записані у декількох різних кодах.

Формат PDF (англ. Portable Document Format) розроблений фірмою Adobe, не залежить від комп'ютерної платформи й призначений для зберігання та ілюстрації векторної й растрової графіки та тексту, причому з великою кількістю шрифтів і гіпертекстових посилань. Для забезпечення малого розміру PDF-файлів використовується компресія, причому для кожного виду об'єктів окремий спосіб. Деякі програми дають можливість не тільки читати, друкувати й експортувати документи, а й редагувати їх графіку формату PDF.

Формат CDR використовується програмою редактора CorelDraw. Він забезпечує можливість запису векторної й растрової графіки та тексту як для PC,

так і для Macintosh комп'ютерної платформи. Формат CDR забезпечує можливість використання інтерактивних спеціальних ефектів (лінзи, прозорість, нестандартні градієнти тощо). Користуватись форматом CDR зручно, однак користувачі мають претензії щодо його стійкості, особливо при поліграфічному відтворені, та сумісності файлів.

На екрані дисплея зазвичай можна розмістити не більше 1280×1024 пікселів зображення. Сучасні супутникові знімки високого просторового розрізнення мають розміри до $5 \cdot 10^4$ x $5 \cdot 10^4$ пікселів. Проблему, що викає під час виведення, растру великого розміру на екран дисплея, вирішують інтерполяцією або ресемплінгом (перерахунок зображення на нову систему пікселів) зображення. Однак це потребує значного машинного часу на розрахунки.

Більш ефективний спосіб вирішення цієї проблеми полягає у використанні так званих пірамідальних шарів – серії попередньо побудованих зображень одного й того ж знімка з послідовно зменшуваним просторовим розрізненням, загрублених у 2 .. 4 рази, які зберігаються разом з первинним растром.

Для ефективної роботи з файлами великих об'ємів використовуються спеціальні структури даних. Один із варіантів спеціальної структури даних – *ієрархічна пірамідальна структура даних* (англ. pyramid layers, reduced resolution datasets). Інший варіант – організація блокової структури даних з прямим доступом до кожного блоку, зазвичай невеликій квадратній ділянці зображення (*англ. tiled format*).

Сучасні методи обробки космічних зображень спрямовані на найбільшу автоматизацію з метою найменшого втручання людини-оператора в процес обробки [50]. Для комп'ютерної обробки придатні цифрові знімки (цифрові дані). Аналогові дані, наприклад, знімки на плівці, повинні бути оцифровані за допомогою планшетного або барабанного сканера й перетворені на цифрову відеоінформацію.

Для сучасних засобів обробки супутникових знімків характерна тенденція зберігати процедури обробки й первинне необроблене зображення, ніж накопичувати файли проміжної обробки. З одного боку, це обумовлене тим, що швидкодія сучасних комп'ютерів зростає швидше, ніж знижується вартість швидкої дискової пам'яті. З іншого боку, при цьому зменшуються втрати інформації первинного зображення, оскільки будь-яка обробка здійснюється для цілком певного використання, а тому не завжди прийнятна для інших напрямків цільового застосування.

Питання для самоконтролю

1. Дайте характеристику растрового способу збереження зображення.
2. Дайте характеристику векторного способу збереження зображення.
3. Наведіть методи стиснення цифрових даних супутникової зйомки.
4. Які формати стиснення зображень супутникової зйомки Вам відомі?

XIII. ДЕШИФРУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ

Віч-на-віч обличчя не побачиш.
Велике бачиться на відстані.
С. Єсенін

Основна мета процедур дешифрування матеріалів дистанційного зондування (МДЗ) зводиться до підвищення їх інтепретованості. Використовувана методика залежить від низки обставин:

– по-перше, від наявних супутникових знімків ДДЗ (SPOT (Systeme Probatoire d'Observation de la Terre), Landsat (Land Satellite), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), ERS (European Remote-Sensing Satellite), Sentinel тощо). При цьому ще до виконання процедур обробки знімка потрібно точно знати характеристики супутника, за допомогою якого цей знімок був отриманий (кількість спектральних діапазонів, їх межі, просторове розрізнення, геометрія зйомки тощо);

– по-друге, від мети обробки (наприклад, апріорне знання спектральної інформативності об'єктів на підстильній поверхні дає можливість грамотно обрати найбільш придатний спектральний канал і значно зменшити обсяг даних, що потребують обробки;

– по-третє, потрібно мати чітке уявлення про остаточний вигляд бажаного інформаційного продукту до того як будуть виконані процедури обробки;

– по-четверте, від очікувань дослідника – що він передбачає виявити в кінцевому інформаційному продукті; аналітика, що буде виконувати обробку зображень.

Сучасні МДЗ мають розрізненність на місцевості від десятків кілометрів до десятків сантиметрів. Отримувати такі дані зараз набагато простіше, ніж ще кілька років тому. Кількість спектральних діапазонів, у яких може здійснюватися зйомка з космічних апаратів, постійно зростає. Зараз існують знімальні системи, які здійснюють знімання у 7, 20, 220 діапазонах.

Однією з важливих вимог, що висуваються до даних ДЗЗ, є оперативність одержання актуальної, нової, змістовної, неупередженої і корисної просторової інформації про земну поверхню та об'єкти (процеси, явища) на ній.

13.1. Загальні відомості про дешифрування МДЗ

Дешифрування – це процес, за допомогою якого розкривається зміст матеріалів дистанційного зондування (МДЗ), тобто встановлюється відповідність між об'єктами досліджень та їх зображеннями; виявляється якісна та кількісна характеристика об'єктів, їх взаємне положення та зв'язок.

Виконується дешифрування за демаскуючими ознаками, що характеризують об'єкт у натурі.

Професійне дешифрування надає величезний об'єм просторової й атрибутивної інформації про територію (об'єкт) дослідження.

Процес дешифрування передбачає етапи: виявлення, розпізнавання, інтерпретації, виявлення якісних і кількісних характеристик об'єктів (процесів, явищ) і подання результатів дешифрування в графічній (картографічній), цифровій або текстовій формі.

Виявлення об'єкта – початковий етап дешифрування, на якому об'єкт сприймається без визначення його суті, тобто виявляється відмінність, на яку потрібно звернути увагу при дослідженні ділянки, що підлягає розгляду.

Розпізнавання об'єкта – другий етап дешифрування, під час якого окремо сприймаються та аналізуються складові ознаки об'єкта і визначається сутність виявленого об'єкта.

Інтерпретація об'єкта – заключний, найскладніший етап дешифрування, під час якого здійснюється аналіз та узагальнення кількісних і якісних характеристик (ознак) об'єкта з метою визначення його стану, небезпеки (значущості) в конкретних обставинах, прогнозу "часу життя" і дії.

Успіх аеро- та супутникових досліджень багато в чому визначається ефективністю проведеного дешифрування. Етап дешифрування є дуже важливим, оскільки він дає найбільший об'єм просторової інформації про досліджувану територію. Наприклад, якщо результат аеро- та супутникових досліджень подається у вигляді карти, то повнота і глибина її тематичного наповнення залежить від якості виконаного дешифрування знімків, а точність картографічної основи – від фотограмметричних визначень.

13.2. Класифікація видів (методів) дешифрування

Класифікацію видів (методів) дешифрування можна проводити за різними критеріями.

За змістом і технологією виконання дешифрування поділяють на *загальногеографічне* або *топографічне* (при дрібномасштабному картографуванні – *ландшафтне*) і *спеціальне* (тематичне, галузеве).

Загальногеографічне дешифрування здійснюється з метою визначення об'єктового складу, наприклад, дешифрування гідромережі, рослинності, населених пунктів, шляхів сполучення, засобів зв'язку, кордонів, меж тощо.

Топографічне дешифрування знімків проводиться з метою знаходження та отримання характеристик тих об'єктів, які повинні бути зображені на топографічній карті. Точність, ступінь деталізації, правила відображення та набір характеристик регламентуються діючими нормативними документами – інструкціями, керівництвами, зокрема, умовними знаками топографічних карт (планів) відповідного масштабу тощо).

Ландшафтне дешифрування проводиться з метою вивчення ландшафтів земної поверхні з наступним регіональним або типологічним районуванням місцевості. Уся розмаїтість елементів ландшафту на знімках відображується точками, лініями, ареалами (полігонами) різного тону і розміру: чим більший на знімку діапазон тонових градацій і кількість дрібних деталей, тим вищі його образотворчі властивості.

Спеціальне (галузеве) дешифрування полягає у вивченні під час супутникових зйомок окремих об'єктів, процесів та явищ для певної галузі. Розрізняють такі види спеціального дешифрування, як військове, топографічне, географічне, геологічне, сільськогосподарське тощо.

Загальногеографічне дешифрування може бути *польовим*, *візуальним* (*аеровізуальним)*, *камеральним* та *комбінованим*.

Польове дешифрування – це розпізнавання (ідентифікація) об'єкта безпосередньо на місцевості шляхом зіставлення об'єкта в натурі з його зображенням на МДЗ.

Польове дешифрування ґрунтується на принципі безпосереднього порівняння МДЗ з натурою і тому може забезпечити необхідну повноту, точність і достовірність своїх результатів на момент дешифрування.

На місцевості маршрути дешифрування проєктуються в такий спосіб, щоб охопити якомога більшу площу (територію). Маршрути повинні проходити по таких місцях, дешифрування яких у натурі забезпечить камеральне розпізнавання контурів на всій іншій території знімання і отримання характеристик об'єктів. які не визначаються приладами. Дешифрування на маршрутах виконується в смузі завширшки 250 м у лісах і 500–1000 – на відкритій місцевості. Станції дешифрування та еталонні площі вибираються в найбільш типових місцях або найскладніших для дешифрування місцях для даного ландшафту. Детально вивчаються всі структури зображення для встановлення взаємозалежності між топографічними об'єктами та зображенням їх на знімку. Для дешифрування важкодоступних районів використовують легкі літаки чи гвинтокрили.

Візуальне дешифрування первісно проводили поодинокими аерофотознімками або стереомоделями за допомогою стереоскопів. Цей вид дешифрування заснований на знаннях, досвіді й інтуїції фахівця, кінцевим завданням якого є точне виявлення дешифрувальних ознак об'єктів, що аналізуються, з метою їх достовірного виявлення.

Сьогодні візуальне дешифрування ведеться переважно із застосуванням комп'ютерних технологій на екрані монітора. У цьому разі знімки, які підлягають дешифруванню, попередньо піддаються машинній обробці з метою їх візуального аналізу.

Аеровізуальне дешифрування виконують безпосередньо з борта літального апарата (літака, гелікоптера) і застосовують для прискорення процесу дешифрування великих однорідних масивів із малою кількістю контурів – лісів, боліт тощо.

Для дешифрування необхідно всі топографічні об'єкти обстежити в полі для визначення їх характеристик. Наприклад, у населених пунктах, крім зовнішніх їх контурів, слід визначити і викреслити житлові та нежитлові, вогнестійкі та невогнестійкі, господарські, промислові та інші будівлі, а також дати їм пояснювальні підписи. При відображенні дорожньої мережі та гідрографії потрібно визначити класифікацію доріг і наявність уздовж них ліній зв'язку, напрямок течії річки, характеристики мостів та бродів, наявність уздовж доріг та річок рослинності. При зображенні різноманітних угідь, крім контурів, слід визначити їх характер: ліс, рідколісся, кущі, луки, сінокіс тощо. Тому доцільно камеральне

дешифрування завершати польовим дешифруванням, хоч таке дешифрування потребує не тільки великої уваги, але і значних затрат часу.

Камеральне дешифрування – це розпізнавання об'єктів на МДЗ в камеральних лабораторних) умовах, шляхом зіставлення зображення з наявними еталонами і знаннями та досвідом самого дешифрувальника.

Для цього використовують альбоми-еталони дешифрування, на яких подано найважливіші та найбільш характерні елементи ситуації типових ландшафтів. Порівнюють еталон зі знімком. На крупномасштабних знімках у камеральних умовах добре дешифрується більшість предметів та контурів місцевості. Однак загалом достовірність результатів камерального дешифрування не завжди може бути гарантована, оскільки його результати відповідають моменту фотографування, а не дешифрування.

Процес камерального дешифрування виконується в два етапи:

- *визначення об'єктів;*
- *викреслювання об'єктів в умовних знаках даного масштабу*.

На першому етапі визначаються які саме об'єкти зображені на МДЗ. Майже всі об'єкти можна віддешифрувати камерально, але основною складністю у цьому процесі є їх визначення. В цьому може суттєво допомогти найпростіший стереоприлад – стереоскоп (рис. 13.1).

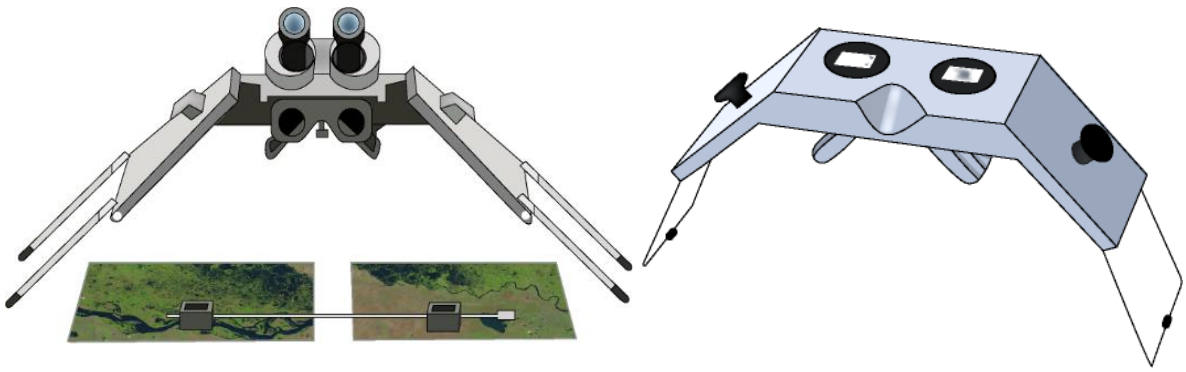


Рис. 13.1. *Стереоскопи*

Стереоскоп – оптичний бінокулярний прилад для перегляду "об'ємних" зображень.

Стереоскоп дає можливість стереоскопічно, зі збільшенням, роздивитись знімок, що значно полегшує розпізнавання об'єктів місцевості та підвищує надійність дешифрування.

Принцип роботи приладу заснований на тому, що якщо сфотографувати якусь сцену з двох точок, розташованих на певній відстані одна від одної (приблизно відстань між очима людини), а потім розташувати пару знімків, які вийшли (так звану стереопару) так, щоб одне око бачило тільки один знімок, а інше око – другий, то можна отримати "об'ємне" зображення.

Стереопара – пара плоских зображень одного і того ж об'єкта (сюжету), що має відмінності між зображеннями, які покликані створити ефект об'єму.

Ефект виникає в силу того, що розташовані на різній відстані від спостерігача частини сюжету при перегляді з різних точок (що відповідають правому та лівому оку) мають різне кутове зміщення (паралакс). При налаштуванні стереопари таким чином, щоб кожне око сприймало тільки зображення, призначене для нього, створюється ілюзія спостереження об'ємної картини.

Другий етап дешифрування – це викреслювання топографічних об'єктів. Цей процес виконують камерально: спочатку викреслюють пункти геодезичної основи, далі – населені пункти, промислові будівлі, дороги, лінії зв'язку, лінії електропередач, гідрологію, рослинність, елементи рельєфу (бровки, урвища та інші), межі угідь та заповнюють їх відповідними умовними знаками.

У низці випадків (у військовій справі, при вивченні небесних тіл) камеральне дешифрування є єдино можливим.

Комбіноване дешифрування поєднує переваги та недоліки польового і камерального дешифрування. На попередньо обраних ключових ділянках проводиться детальне польове розпізнавання об'єктів і створюються еталони. Решта території розпізнається в порівнянні з еталоном у лабораторних умовах.

Як правило, в зимовий період виконується камеральне дешифрування, а в літній – польову перевірку й уточнення одержаних взимку результатів.

Залежно від мети дослідження і дешифрування може бути доволі простим (ліс, водойма, рілля, льодовик тощо) і більш складним.

За ступенем автоматизації методи дешифрування даних ДЗЗ поділяють на автоматизовані й автоматичні.

Автоматизовані методи дешифрування передбачають участь у процесі дешифрування комп'ютерних засобів і людини (дешифрувальника). Цей процес передбачає введення зображень у комп'ютер (цифрування аналогових і/або імпорт цифрових зображень), тематичне дешифрування й інтерпретацію людиною результатів. Формувати базу даних, обробляти МДЗ та цифровий рельєф, здійснювати дешифрування дозволяють ГІС, бази даних яких містять аерокосмічні дані, цифровий рельєф, геологічні, геофізичні, геоморфологічні, структурні й інші дані, що приведені до єдиної картографічної проєкції, тощо. Для здійснення автоматизованого дешифрування необхідне створення тематичних класифікаторів.

Процедура навчання класифікаторів має на увазі одночасне створення бази знань і бази даних. Класифікатор може бути навчений, виходячи з апріорно відомих значень, які відповідають певному типу с/г земель, чи створення вибірок, що навчаються безпосередньо на знімку.

У процесі експертного тематичного дешифрування обирається певна послідовність операцій, спрямована на підвищення інформативності зображення. Візуальне дешифрування в значному ступені залежить від зорового сприйняття, знання ландшафту і геологічної будови території та його модельних представлень. Цим пояснюються різні результати дешифрування, що отримані різними експертами.

Автоматичне дешифрування передбачає використання методів формалізованого комп'ютерного аналізу зображень. Усі автоматичні пристрої для розпізнавання зображення при перегляді знімку поділяють на дві групи: пристрої, які розпізнають зображення за певними заздалегідь підібраними ознаками (працюють

за жорсткою програмою), і пристрої, які самі виробляють оптимальні ознаки та використовують їх для розпізнавання зображень.

Оскільки оптичні властивості ландшафту постійно змінюються, створення універсального каталогу дешифрувальних ознак для автоматизованого дешифрування є непідйомним завданням. При візуальному дешифруванні такими каталогами слугують таблиці дешифрувальних ознак (при використанні прямих ознак) і ландшафтно-індикаційні таблиці (при використанні непрямих ознак).

13.2.1. Візуальне дешифрування

Візуальне дешифрування −найпоширеніший спосіб одержання інформації зі знімків. При візуальному дешифруванні досліджуваний локальний об'єкт або явище завжди розглядається в просторовому взаємозв'язку з його оточенням, що дає важливу, найчастіше вирішальну додаткову інформацію, яка зазвичай вислизає під час комп'ютерної обробки.

При візуальному дешифруванні виділяють:

− *зорове сприйняття,* коли виділяється яскравість, колір, розмір, об'єм об'єкта (території);

− *логічне сприйняття,* коли дешифрувальником формується логічний ланцюг, відбувається групування окремих ознак об'єктів у рисунок і визначення їх, використовуючи схожі образи.

Сприйняття яскравості – фізіологічна величина, яка характеризує відчуття світла людиною. Дешифрування зображень – це фізіологічний процес, пов'язаний із роботою зорового аналізатора. Від порогу чутливості зорового аналізатора залежить ефективність процесу дешифрування.

Поріг чутливості – мінімальна світлова дія, яка може бути зареєстрована приймачем випромінювання. Розрізняють три пороги чутливості: *розпізнавальний*, *розрізнюваний* і *стереоскопічний*.

Розпізнавальний поріг (*δ)* − визначається контрастом зображення, тобто різкістю оптичних щільностей зображення сусідніх деталей (*Д1 та Д2)*.

$$\delta = Д1 - Д2.$$

Ця величина визначається дослідним шляхом і становить 0,06. Для розмитого, нерізкого зображення розпізнавальний поріг зменшується. Поріг чутливості неоднаковий для різних кольорів.

Колір – це відчуття, яке виникає у людини при сприйнятті світла з різними довжинами хвиль. Око людини сприймає відмінності в довжинах хвиль світла в діапазоні 0,390–0,70 мкм. Найбільш чутливе людське око до жовтого і блакитного кольорів, де поріг чутливості δ становить 0,001. Кількість відтінків кольору вимірюється тисячами, тобто людина значно краще розрізнює кольори, ніж відтінки сірого.

Для надійного розрізнення сусідніх об'єктів суттєвим чинником є наявність контуру. Поступовий перехід від низької яскравості до високої або навпаки погано сприймається оком. Для дешифрування це має вирішальне значення: ареали,

що мають чіткі межі, тобто такі, які контрастують із фоном оточення, розрізняються краще, на відміну від тих, які мають розмиті межі. Крім того, світлові рівні яскравості око сприймає краще, тому деякі об'єкти краще розрізнюються на негативах (наприклад, темні об'єкти – зелені посіви на чорноземах), а світлі – на позитивних відбитках (деталі рельєфу поверхні, вкритої снігом).

Розрізнювальний поріг (гострота зору) – мінімальний розмір, що сприймається оком. Зазвичай при нормальному контрасті a = 0,12 мм (кружечок діаметром 0,12 мм). Розрізнення малих об'єктів залежить від контрасту між об'єктом і фоном, різкості його меж: чим більшим є контраст і більш різкими є межі, тим менший розмір деталі можна розрізнити. На сприйняття площинних об'єктів впливає їх форма: чим компактнішим виступає об'єкт, тим легше від розрівнюється.

Стереоскопічний поріг – (глибина зору) – здатність сприймати глибину простору та оцінювати відносне розташування об'єктів у просторі. Глибина зору пов'язана з видаленням об'єкта і мінімальною відстанню між об'єктами в глибину, при якій вони не зливаються один з одним. Ця величина кутова і зазвичай становить від 10 до 2511. Розрізненність монокулярного зору виявляється в 2 рази нижчою (20–40).

13.2.2. Автоматизоване й автоматичне дешифрування

Автоматизоване й автоматичне дешифрування відноситься до фундаментального наукового напрямку – *розпізнавання образів*.

Порівняння можливостей візуального й автоматичного методів дешифрування подано в табл. 13.1.

Таблиця 13.1

Порівняння можливостей візуального й автоматичного методів дешифрування

Метод	Виконавець	Переваги	Недоліки
Візуальне дешифрування	Людина	– Використання досвіду дешифрувальника; – Можливість виявлення особливостей просторового розташування об'єкта на високому рівні	– Потребує багато часу; – Суб'єктивність результатів дешифрування
Автоматичне дешифрування	Комп'ютер	– Не потребує багато часу; – Висока продуктивність; – Можливість одержання інформації з фізичних носіїв та індексів	– Неможливість використання досвіду дешифрувальника; – Обмежене виявлення особливостей просторового розташування об'єкта

Проте останнім часом відбувається інтеграція цих видів дешифрування, оскільки кожен з них має свої переваги і недоліки. Так, візуальне дешифрування знімків на екрані комп'ютера успішно доповнюється автоматизованою обробкою

за спеціальними програмами, які дозволяють покращити дешифрувальні властивості знімків або більш швидко і детально виділити об'єкти, що чітко відобразились.

Для класифікації об'єктів різного типу, визначення меж між ними широко використовуються методи комп'ютерної кластеризації.

У результаті дешифрування МДЗ утворюється нова інформація про просторові об'єкти, яку можна відобразити у вигляді карти (нової або доповненої, доробки існуючої).

Результати візуального дешифрування доволі часто мають суб'єктивний характер, тому для одержання точної інформації слід вводити міру і число, тобто здійснювати фотограмметричну обробку знімків. Через це існують *інструментальне* і *вимірювальне* дешифрування, коли в процесі дешифрування застосовуються відповідні інструментальні та вимірювальні засоби. В результаті дешифрування і фотограмметричних вимірів отримують предметно-змістовну інформацію про об'єкти, їх географічне місце розташування, геометричні характеристики, спектральний склад тощо.

Якщо результат отримується на основі чисельних характеристик, то таке дешифрування називають *кількісним*.

Для дешифрування знімків використовують спеціальні методи і додаткові дані, одержані з різних джерел – карт, звітів про польові дослідження і попередньо одержаних результатів аналізу знімків цієї ж території. На основі аналізу перерахованих джерел заздалегідь встановлюються класи об'єктів, які потрібно буде виділити на вихідному знімку.

Коли мова йде про виділення та опис індивідуалізованих об'єктів, створених людиною або природних (наприклад, окремих будівель, окремих гірських або лісових масивів, родовищ їх індивідуальними характеристиками, з їх конкретним положенням, межами, площею і типом використання), то кажуть про *об'єктне дешифрування* і для подання його результатів найкраще підходить векторна ГІС.

При об'єктному дешифруванні виділяють дві під задачі (рис. 13.2), які іноді нерозривно пов'язані між собою, а іноді вимагають окремого підходу.

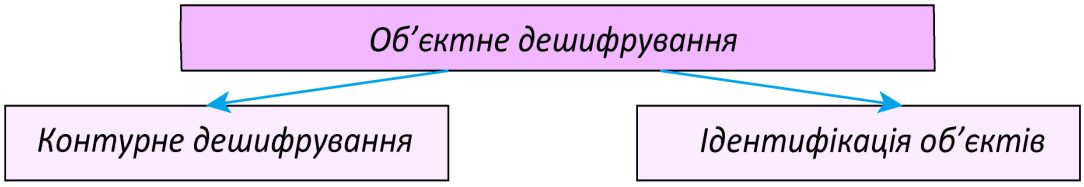


Рис. 13.2. *Складові об'єктного дешифрування*

Це *контурне дешифрування*, що має на меті якомога точніше визначення меж і положення об'єктів та *ідентифікація об'єктів* (визначення індивідуальних характеристик об'єкта або належність до певного класу).

Іноді ці дві підзадачі потребують використання різних типів ДДЗ і різних підходів до їх обробки. Наприклад, для точного проведення меж площинних об'єктів використовують дані панхроматичних (чорно-білих) зйомок, що мають більш високе геометричне розрізнення, а для одержання інформації про властивості об'єктів (наприклад, чим засіяне поле) використовують багатозональні

зйомки SPOT із двічі меншим розрізненням, але які мають три зони спектра або зйомки LANDSAT (що мають утричі менше геометричне розрізнення, проте мають сім зон спектра).

У деяких випадках достатньо тільки виділити, зафіксувати наявність об'єкта певного типу в певному місці, а отримання додаткових індивідуальних характеристик не вимагається або подібного роду задача розв'язується іншими методами. В таких випадках мова йде про *дешифрування виявлення*. Його результати в комп'ютері також більш ефективно подаються векторною ГІС.

У випадках, коли дослідника цікавлять не стільки індивідуалізовані площинні об'єкти, скільки класи, категорії об'єктів і покриті ними території (типи рослинного покриву, типи лісів тощо), оптимальне подання результатів такого дешифрування (що, власне, є класифікацією, районуванням території відносно певної якості) може бути одержане або в растровій, або у векторній ГІС із використанням об'єктів типу регіонів. Останній варіант є більш привабливим, оскільки вдається ефективно описати точні межі об'єктів, їх топологічні відношення і зручно подати площинні об'єкти. Таке дешифрування іноді називають *тематичним*, маючи на увазі близьку відповідність його результатів найбільш типовим принципам організації тематичних карт (лісових, геологічних, ґрунтових, ландшафтних тощо). В цьому разі тематичні карти можна протиставити кадастровим, реєстраційним картам, орієнтованим не стільки на типові, скільки на індивідуальні ознаки об'єкта. Для створення кадастрових карт можуть використовуватись усі перераховані типи дешифрування в поєднанні з даними, що отримуються при відвідуванні об'єкта, або методи геодезії для точного оконтурювання меж об'єкта і методи тематичного дешифрування для отримання низки його узагальнених характеристик або моніторингу поточного стану.

Крім того, окремо існують способи отримання з МДЗ кількісної інформації, безперервно розподіленої по території, тобто такої, яку доцільно подавати не у вигляді індивідуалізованих об'єктів, а у вигляді числових полів. Найбільш яскравим і практично важливим прикладом слугує рельєф місцевості.

Іноді МДЗ використовують як растрову підкладку для векторної ГІС, для підвищення наочності, а витяг інформації у вигляді окремого результату дешифрування не відбувається. Але і в цьому випадку варто розв'язати деякі задачі, що стосуються обробки знімка для підготовки його для такого використання.

Часто замість терміну *дешифрування* використовується термін *інтерпретація* (тлумачення).

13.3. Інформаційні властивості МДЗ

Від каналу передачі МДЗ вимагається передавати результати зйомки про місцевість без викривлень.

Будь-яка інформація має дві складові: якісну і кількісну; крім того характеризується надлишковістю і недостатністю. Для дешифрування важливішими є й загальна кількість інформації про місцевість, що отримується з МДЗ, та якісний вид повідомлення, його конкретний зміст.

Надлишок інформації пояснюється тим, що на МДЗ зображуються ті об'єкти, які не відображуються на картах (рух транспорту, копиці сіна тощо). Нестача інформації викликана труднощами визначення якісних і кількісних характеристик об'єктів у камеральних умовах.

Призначенням дешифрування, як відомо, є отримання якомога більше інформації за МДЗ. На результати дешифрування впливає інформаційна ємність, тобто об'єм відомостей про територію зйомки. Виділяють *формальну, імовірнісну* й *оціночну* інформаційні ємності.

Формальна інформація відбиває зв'язок об'єму відомостей, що зареєстровані на МДЗ, розрізненністю і контрастністю МДЗ. Об'єм інформації залежить від розміру точок – пікселів або зерен емульсії, з яких складається зображення.

Зображення, що складається з n точок, кожна з яких може мати будь-який з m тонів, здатне приймати $N=m\ n$ кількість різних станів. Зазвичай, інформаційна ємність виражаєтеся через логарифм числа станів

$$I = logN = n\ logm.$$

Знаючи площу знімка і його розрізненність, можна підрахувати число дискретних елементів фотографічного зображення:

$$n = R\cdot(2S).$$

Наприклад, при R = 10 лін/мм $n = 15\cdot10^6$. З одного боку, кількість інформації повинна зростати зі зростанням R. Але ця залежність, у свою чергу, залежить від характеру рельєфу. Якщо поверхня однорідна (сніг, луг, пісок), то більша кількість точок навряд чи збільшить інформаційну ємність. Це свідчить про те, що значно більше значення має збільшення кількості тонів. Тобто, чим більше рівнів тональності, тим більше контурів можна розрізнити. У цьому разі вводиться поняття імовірнісної інформації.

Кількість інформації пов'язана з імовірністю або частотою появи того або іншого об'єкта. Тоді кількість мінімальної інформації розраховується за формулою Шеннона:

$$H = – P(x)\ logP(x),$$

де H – ентропія, за допомогою якої кількісно виявляється невизначеність впізнавання. Тобто чим більша ентропія (невизначеність), тим менше інформація; $P(x)$ – імовірність появи об'єкта, яка збільшується зі зменшенням кількості тонів.

Оціночна інформація поділяється на корисну, умовно корисну і некорисну. Корисна – це інформація, яка складає мету дешифрування. Умовно корисна − відомості, які слугують індикатором для отримання корисної інформації. Некорисна – відомості, що не становлять цінності (шум). На підставі інформаційних властивостей МДЗ оцінюється можливість їх дешифрування.

13.4. Вимоги до якості дешифрування

Вимоги до дешифрування поділяють на чотири категорії: повнота, достовірність, своєчасність (актуальність) і наочність.

Повнота – оцінюється якісним показником: задовольняє чи не задовольняє отримана інформація поставлені задачі.

Для оцінки повноти використовують відношення між кількістю виявлених подробиць до їх загальної кількості.

Абсолютна дешифрованість I_{max} розраховується через інформаційну ємність (у бітах).

Відносна дешифрованість $Д = I/I_{max}$ відношення корисної інформації до повної.

Достовірність – відношення правильно розрізнених об'єктів до кількості всіх розпізнаних:

$$Д = n/N.$$

Камеральне дешифрування має достовірність нижче 100% і залежить від можливостей виконавця, від якості МДЗ, від характеру ландшафту (географічного положення). Найкращим результатом вважається прийнятна імовірність розпізнавання 0,75, або 75%. Для збільшення достовірності необхідне польове обстеження.

13.5. Класифікація дешифрувальних ознак

Під дешифрувальними ознаками розуміють характерні особливості об'єктів, за якими їх вдається розпізнати, виділити серед інших та інтерпретувати.

Дешифрувальні ознаки поділяють на *прямі* і *непрямі*.

Властивості об'єктів, що знаходять безпосереднє відображення на знімках, прийнято називати прямими дешифрувальними ознаками.

Прямі дешифрувальні ознаки – це ознаки з яких складається зоровий образ об'єкта – колір (фототон, оптичні характеристики), розмір і форма (геометричні характеристики), тобто власні якості об'єктів зйомки, які безпосередньо відобразились на знімках.

Прямі ознаки вказують на особливості геометрії, розміри і форму об'єкта дослідження. До прямих ознак відносяться також текстура *структура* зображення, яка пов'язана зі зміною в просторі і взаємним розташуванням ділянок МДЗ, що різняться за оптичними характеристиками і *текстура зображення* (наприклад, смугаста, однорідна, плямиста тощо), які також можуть бути надійними прямими індикаторами при розпізнаванні геологічних об'єктів (порід).

При геологічному дешифруванні прямими ознаками можна користуватися в геологічно відкритих районах, де корінні породи виведені на поверхню Землі. Спектрометричні характеристики та рисунок зображення, що обумовлені самими породами, дозволяють виявляти генетичні відмінності гірських порід і умови їх залягання, розривні порушення тощо.

Прямі ознаки безпосередньо відображаються на знімку дешифрованих об'єктів.

Непрямі ознаки характеризують об'єкт дешифрування опосередковано, через якийсь інший природний компонент (рослинність, ґрунт, обводнення тощо).

За цими ознаками здійснюється логічна інтерпретація, що заснована на аналізі сполучень різних властивостей об'єктів, відбитих у їх зображеннях на МДЗ. Серед них основне значення мають геоморфологічні ознаки, характер рослинності, колір та зволоження ґрунту, водні джерела.

Непрямі дешифрувальні ознаки виникають із закономірностей взаємного розташування об'єктів місцевості через природні умови, їх призначення, господарське використання тощо. Відомо, що рельєф дуже чітко реагує на геологічну обстановку як на поверхні, так і на глибині, що існує взаємозв'язок між ґрунтовим покривом, рослинністю і ґрунтоутворюючими породами. Ці співвідношення не завжди однозначні. Вони набувають специфічних рис у різних кліматичних зонах, затушовуються під впливом господарської діяльності людини. Їх значення може змінюватися залежно від тектоніки регіону і масштабу зйомки. Наприклад, у геосинклінальних поясах, для яких характерні велика швидкість сучасних тектонічних рухів, можна спостерігати у маловикривленому вигляді просторові сполучення окремих структур. Гарна оголеність порід сприяє одержанню за МДЗ інформації про форму геологічних тіл, склад і потужність порід, з яких вони складаються. У рівнинних і платформних зонах визначальне значення для виявлення геологічних структур непрямих ознак ускладнене через буйну рослинність, потужний покрив сучасних відходів господарської діяльності людини.

До непрямих ознак відносяться існуючий в натурі взаємозв'язок, що відобразився на знімках, взаємозалежність або взаємообумовленість різних об'єктів і явищ та супутніх їм характеристик. Наприклад, світла звивиста лінія між населеними пунктами майже напевно є зображенням стежини; світлі звивисті лінії, що зникають у лісі або в полі, – польові або лісові дороги; споруда поблизу перетину світлої звивистої смуги (ґрунтової дороги) із залізницею свідчить про наявність тут переїзду; дорога, що обривається на березі річки, та її продовження на іншому березі свідчить про наявність броду або порому. Логічний аналіз прямих і непрямих дешифрувальних ознак значно підвищує достовірність дешифрування.

Непрямі дешифрувальні ознаки є доволі стійкими. Із зменшенням масштабу МДЗ прямі дешифрувальні ознаки видозмінюються. Так, якщо за знімками масштабу 1:5000 безпосередньо виявляється більшість об'єктів, що дешифруються, то на знімках масштабу 1:10 000 і менше зникають багато малих об'єктів – колодязі, стовпи, репери тощо, а деталі об'єктів середнього розміру стають невиразними.

Непрямі дешифрувальні ознаки поділяють на дві групи. До першої групи відносяться *природні взаємозв'язки між компонентами ландшафтів*, наприклад зв'язок рослинності з рельєфом, рельєфу з гідрографією, ґрунтів з рослинністю тощо. Відповідно до цього непрямі ознаки поділяють на геоботанічні, геоморфологічні тощо. В цілому всі ці ознаки називаються *непрямими ландшафтними*. До другої групи відносяться антропогенні об'єкти, а також зв'язок між ними, природними об'єктами та явищами. Такі ознаки називаються *непрямими соціально-географічними.*

Індикаторами геологічних об'єктів зазвичай виступають непрямі ознаки першої групи. Найважливішим індикатором геологічних об'єктів є рельєф. Різні форми рельєфу тісно пов'язані з процесами утворення рельєфу і, отже, знаходяться у взаємозв'язку з усіма природними об'єктами і явищами. Важливу роль відіграють елементи гідрографії: річки, озера, водосховища, болота. Тісний зв'язок структури і щільності гідрографічної мережі з геологією та рельєфом дозволяють використовувати, наприклад, рисунок річкової мережі як основну ландшафтну ознаку при геологічному і геоморфологічному аналізі.

Елементи ландшафту можуть проявляти геологічні об'єкти, які безпосередньо на МДЗ не спостерігаються. Наприклад, непрямою ознакою локального підняття може бути ділянка підвищеного ерозійного розчленування, відцентровий і огинаючий рисунок річкової мережі. Особливо велике значення ландшафтні ознаки дешифрування мають у закритих, заболочених районах в зонах тундри, лісотундри, тайги. Ландшафтні ознаки головним чином локальні. Але серед усієї її множини можна виділити типові, багатократно повторювані комбінації – рисунки зображення.

Виділяють також ***контекстуальні (топологічні) ознаки***, які характеризують властивості об'єктів земної поверхні, що проявляються для конкретного об'єкта під час аналізу ознак його оточення.

Дешифрувальні ознаки можуть бути більш-менш *стійкими* або взагалі *нестійкими*. Одні й ті ж ознаки в різних природних умовах можуть характеризувати різні предмети і різні їх властивості. Більш достовірне розпізнавання (розрізнення) геологічних об'єктів дає комплекс ознак. Хоча зустрічаються *специфічні ознаки* (унікальні) і *широко поширені* (повторювані).

Абсолютних ознак, використання яких забезпечує завжди і всюди стовідсоткову імовірність розпізнавання певного об'єкта, *не існує*.

13.5.1. Прямі дешифрувальні ознаки

Форма – одна з основних дешифрувальних ознак, за якою встановлюється наявність об'єкта і його основні властивості.

Об'єкти ландшафту достатньо впевнено пізнаються за їх контурами або формами. Саме контури об'єкта, або його форма, сприймаються при дешифруванні в першу чергу.

Розрізняють *геометрично визначену* і *невизначену* форму об'єктів. Це справедливо як для природних, так і антропогенних об'єктів. Визначена, геометрично правильна форма є найважливішою ознакою штучних споруд, тоді як невизначена форма характерна для природних об'єктів як площинного (луки, ліси), так і лінійного (струмки, брівки ярів тощо) характеру (рис. 13.4).

Форма лінійних меж, площинна конфігурація та об'ємні форми геологічних тіл дозволяють виявити межі шаруватих товщ, елементи їх залягання, положення зміщувачів, зсуву розривів, контактів інтрузій.

За характерною формою добре дешифруються вулканічні об'єкти, геологічні границі, розривні порушення, інтрузивні тіла, різні в тектонічному відношенні регіони тощо.

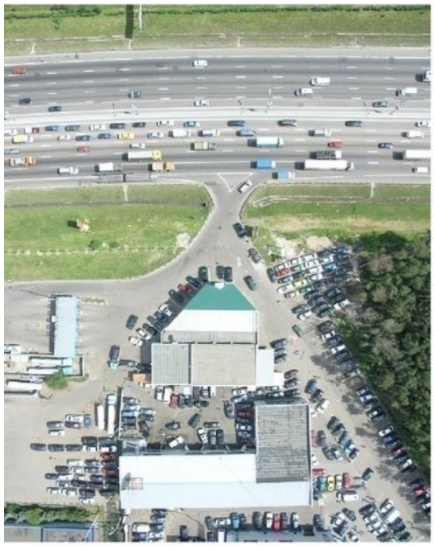


Рис. 13.4. *Правильна геометрична форма є найважливішою ознакою штучних споруд, невизначена (неправильна) форма характерна для природних об'єктів*

Антропогенні об'єкти (створені людиною) мають чіткі границі і правильну форму. Форма природних об'єктів (лісних масивів, водойм тощо) є нерегулярною. Так, профільовані дороги найчастіше зображуються чергуванням прямолінійних ділянок, зв'язаних плавними кривими. Господарські споруди, теплиці, мости тощо мають прямокутну витягнуту форму.

Проте форма не може слугувати вирішальною дешифрувальною ознакою. Наприклад, звивистий контур може бути річкою і польовою дорогою; круглий контур може бути зображенням басейну і копиці сіна тощо.

Задачі, які розв'язуються під час геологічного дешифрування: визначення кутів падіння шаруватих товщ, кутів нахилу рельєфу, контактів інтрузивних масивів разом із породами.

Розмір уточнює інформацію, яку дає форма (рис. 13.5).

Рис. 13.5. *Ознака "розмір" уточнює інформацію, яку дає форма, і залежить від масштабу*

Розмір природних і антропогенних об'єктів залежить від масштабу. При цьому важливо знати масштаб знімка, що визначає розмір зображення, або мати

еталон, що дозволяє порівнювати розміри зображень лісу і озера, окремої споруди і стадіону тощо. Розмір зображення на МДЗ, помножений на знаменник масштабу знімка, дає розмір предмета на місцевості, що у сполученні із формою є суттєвою дешифрувальною ознакою.

Під час дешифрування аналізуються відносні розміри об'єктів на одному і тому ж знімку. Найчастіше їх приблизний масштаб на знімку оцінюють, порівнюючи їх зі знайомими елементами місцевості (наприклад, дороги). Або, розмір приватного будинку повинен бути меншим від розміру великого торгового центру тощо. Коли потрібна підвищена точність, використовуються стереофотограмметричні прилади.

Розміри геологічних тіл дозволяють у деяких випадках робити висновки про їх походження й особливості будови регіону.

Колір (тон, фототон) об'єкта залежить від його відбивної здатності, характеристики падаючого світлового потоку, його зовнішньої будови, освітленості, часу зйомки, вогкості, режиму фотодруку тощо (рис. 13.6).

Рис. 13.6. *Ознака "колір"*

Тоном називається ступінь почорніння або яскравість зображення на знімку.

При нормальному зорі на чорно-білих знімках фіксується до 35 відтінків у інтервалі від чорного до білого кольору. Тон зображення залежить від факторів: яскравість об'єкта, його "фотогенічність", колір, умови фотографування, склад плівки, якість паперу. На МДЗ це відображується ступенем почорніння чи яскравістю зображення (рис. 13.7).

Максимальне освітлення мають поверхні, розташовані перпендикулярно до сонячних променів. Так, сухі дороги і кам'яні забори зображуються майже білими лініями. Освітлені схили дахів будівель, суха земля, мости – світло-сірими, майже білими. Водні поверхні, що поглинають світло, зображуються темними тонами, і чим більша глибина, тим чорніший. Водночас каламутна, пінна або покрита брижами вода зображується сірим тоном, і тим світліший він, чим менша її прозорість. Ґрунт зображується тим темнішим, чим більша його вогкість; рослинність зображується тим чорнішою, чим темніше її забарвлення в натурі.

Якщо тон зображення розкласти на 256 градацій, то око людини розрізнятиме тільки 25. Для дешифрування цілком достатньо семи (білий, майже білий, світло-сірий, сірий, темно-сірий, майже чорний і чорний).

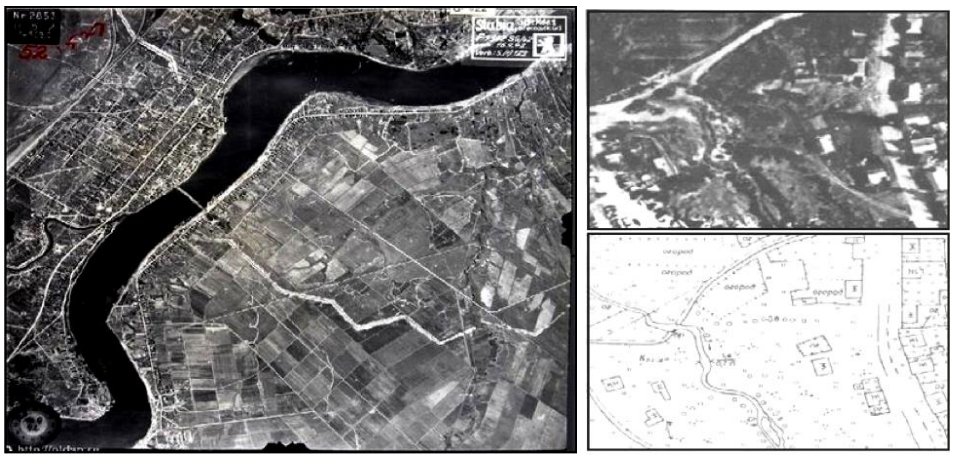


Рис. 13.7. *Ознака "тон" відображується ступенем почорніння чи яскравістю зображення*

Враховуючи нестабільність показника, при дешифруванні фототон оцінюють тільки в поєднанні з іншими дешифрувальними ознаками (наприклад, структурою). Проте саме фототон виступає основною дешифрувальною ознакою, яка дешифрує контури меж, розміри і структуру зображення об'єкта.

Відбивна здатність залежить від характеру поверхні об'єкта (гладка, матова, шорстка). Гладка поверхня води відбивається на знімку яскраво-білим або майже чорним тоном. Матова – дає сірий тон. Тіні, що відбиваються об'єктами, дозволяють при дешифруванні розрізняти об'ємні й плоскі предмети. Рисунок рельєфу часто повністю визначається геологічною будовою: структурними особливостями, літологічним складом, фізичними властивостями й умовами утворення порід. Проявлення денудації та акумуляції матеріалу відображається на поверхні характерними формами рельєфу і розвитком дрібної гідрографічної мережі. Особливості рисунка рельєфу притаманні не тільки комплексам гірських порід, але й кожній пачці пласта. Відрізняють струмистий рисунок рельєфу, який розвивається на крутих схилах та м'яких породах, і гілчастий – на масивних породах (граніти та ін.). Характер ерозійної мережі (щільність, орієнтування та сполучення річкових долин і ярів) дозволяє створити уяву про тріщинуватість, склад, водопроникнення та проявлення розривної тектоніки.

Кількісна оцінка фототонових відмінностей за показниками оптичної щільності здійснюється за допомогою мікрофотометрування і може становити інтерес у разі геологічного дешифрування відкритих регіонів, а для закритих – за наявності доведеного зв'язку поверхневих утворень із геологічною структурою. Для виділення фото тональних відмінностей, які важко розрізнити неозброєним оком застосовують спеціальну апаратуру, яка дозволяє фарбувати в різні кольори ділянки знімків, що різняться однаковою тональністю.

Колір (колірні відмінності між об'єктами) на кольорових знімках є одними з основних дешифрувальних ознак, проте застосовувати їх у геологічному дешифруванні потрібно обережно через сильну мінливість.

Колір і тон є нестійкими ознаками внаслідок низки причин: різної освітленості, атмосферного розсіювання, змін складу порід, що залягають на поверхні,

ступеня вологості й інших причин, що дозволяє їх відносити до категорії відносних.

Колір і його насиченість є найдостовірнішою ознакою, оскільки під час зйомки з натуральним відображенням кольорів об'єктів місцевості відповідає кольорам фотозображення. Найкращі результати одержують при дешифруванні спектрозональних знімків із високим колірним контрастом.

Тінь об'єкта є однією з важливих дешифрувальних ознак. Розрізняють *власні тіні*, що утворені в результаті різної освітленості поверхні об'єкта в поєднанні з її нерівностями, і *тіні падаючі*. Так, різні частини крони дерева, схили даху, яри, насипи тощо, одержують різну кількість сонячного проміння на одиницю поверхні, що визначає їх густину і структуру. Форма утвореної предметом тіні і її розмір дозволяє будувати висновки про висоту дерева, башти або глибину ями, канави, а, отже, і про зміст об'єкта. При цьому на розмір тіні впливає рельєф місцевості. Падаючі тіні відображають витягнуту форму силуету об'єкта і залежать від висоти об'єктів та положення Сонця в момент фотографування. Чим нижче Сонце, тим довші падаючі тіні. Різкі межі кутових об'єктів є характерними для дахів будинків, а розмиті – свідчать про плавну поверхню, наприклад, крони дерев (рис. 13.8).

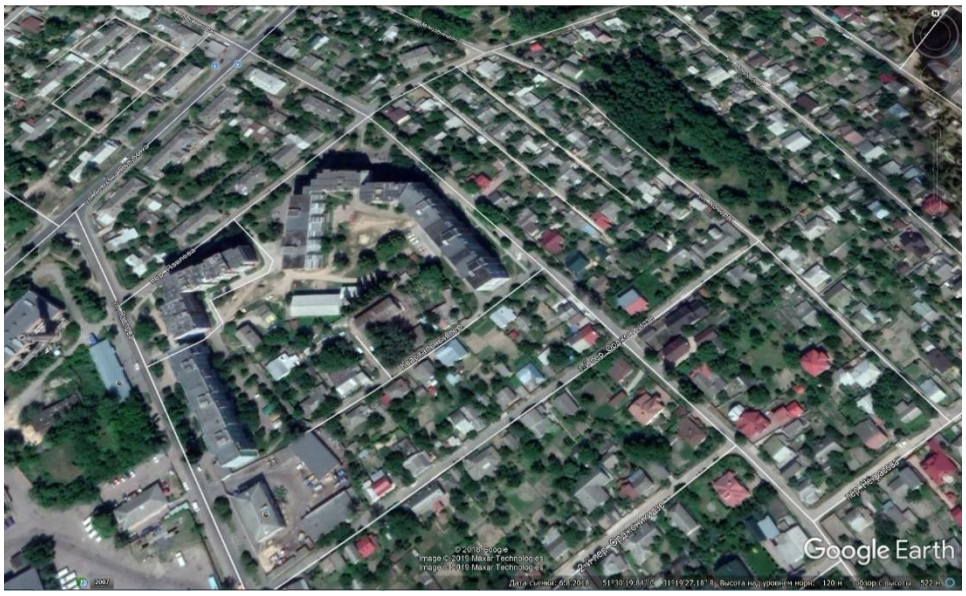


Рис. 13.8. *Ознака "тінь"*

Цю властивість використовують при дешифруванні огорож, телеграфних стовпів, водонапірних і силосних башт, зовнішніх знаків пунктів геодезичної мережі, окремих дерев, а також різко виражених форм рельєфу.

Глибокі тіні на знімках гірських територій заважають дешифруванню – наприклад, затушовують шаруватість, складчастість тощо. В той же час підвищення щільності фототону свідчить у даному випадку про розчленованість рельєфу.

Образ. На знімках часто виявляються об'єкти схожого виду. Ця обставина багато в чому полегшує дешифрування, особливо під час аналізу і картування складних геологічних утворень (метод подоби).

Текстура (структура) – важлива якісна характеристика фотозображення, що тісно пов'язана з фототоном і дозволяє виділити ділянки зображення з однаковим рисунком (рис. 13.9), що обумовлені комбінацією мікротонових відмінностей.

Рис. 13.9. *Ознака "текстура"*

Текстура є складною ознакою, що поєднує деякі інші прямі дешифрувальні ознаки (форму, тон, розмір, тінь) компактної групи однорідних і різнорідних деталей зображення місцевості на знімку. Повторюваність, розміщення і кількість цих деталей приводять до виявлення нових властивостей і сприяють підвищенню достовірності дешифрування. Важливість цієї ознаки підвищується із зменшенням масштабу знімка.

Існує велика кількість структур, утворених поєднаннями точок, площ, вузьких смуг різної форми, ширини і довжини.

Зерниста текстура характерна для зображення лісів. Рисунок створюється сірими плямами округлої форми (кронами дерев) на темнішому фоні, створюваному затіненими проміжками між деревами. Аналогічну структуру має зображення культурної рослинності (садів). Однорідна структура утворюється однотипною формою мікрорельєфу і характерна для низинних трав'янистих боліт, степової рівнини, глинистої пустелі, водоймищ при спокійному стані води.

Смугаста текстура характерна для зображень міст і розораної ріллі і є наслідком паралельного розташування борозен.

Дрібнозерниста текстура характерна для зображення чагарників різних порід.

Мозаїчна текстура утворюється рослинністю або ґрунтовим покривом неоднакової вогкості і характерна для безладно розташованих ділянок різного тону, розмірів і форм. Аналогічна *текстура*, створена чергуванням прямокутників різного розміру і густини, характерна для зображення присадибних ділянок.

Плямиста текстура характерна для зображень садів і боліт.

Квадратна текстура характерна для деяких типів лісових боліт і населених пунктів міського типу. Вона утворюється поєднанням ділянок лісу, розділених світлими смугами болота, і читається як поєднання площ однорідного тону. Таку ж текстуру утворюють зображення багатоповерхових будівель (відносно

великі прямокутники) і елементів внутрішньоквартальної забудови в населених пунктах.

Текстура зазвичай застосовується в сукупності з іншими ознаками. Наприклад, знімки різних порід можуть мати однаковий фототон, але різну текстуру.

Місце розташування. На заключних етапах дешифрування інтерпретацію і класифікацію низки об'єктів можна уточнити за їх місцем розташування відносно інших, уже розшифрованих об'єктів. Наприклад, складка невідомої природи, що розташована між двома антикліналями, швидше за все є синкліналлю тощо.

Взаємне розташування геологічних об'єктів дає можливість визначити їх положення (просторове і вікове) в будові регіону, а іноді й тип гірських порід. Наприклад смугастий рисунок зображення є основною ознакою осадових і метаморфічних порід, причому характер смугастості іноді сприяє визначенню їх складу. Особливості взаємовідношень тектонічних елементів визначають тектонічний стиль досліджуваного регіону.

Розрізнення на місцевості. Розрізненність обмежує розмір об'єктів, які можуть бути розрізнені. Розрізненність знімка залежить від особливостей апаратури, за допомогою якою від одержаний, від стану навколишнього середовища під час спостереження і від наступної обробки отриманої інформації.

Стереоефект. Стереоскопічна модель зображення дає інформацію, яку неможливо одержати з окремого знімка.

13.5.2. Непрямі дешифрувальні ознаки

Рельєф. Наявність зв'язку між геологічною будовою і рельєфом лежить в основі його використання як основної і найбільш інформативної з непрямих ознак індикатора геологічних об'єктів. Рельєф при геологічному дешифруванні – універсальний індикатор проявлення цілої низки геологічних процесів і об'єктів: новітніх тектонічних і сучасних процесів, диз'юнктивних порушень, плікативних, структур тощо (рис. 13.10).

Рис. 13.10. *Ознака "рельєф"*

Розпізнавання речовинного складу гірських порід засноване на можливості бачити на знімку дрібні форми рельєфу поряд із мезо- і макроформами. Ці ж

ознаки з урахуванням взаємного просторового розташування елементів рельєфу є основними при дешифруванні тектонічної будови.

Дослідження різних форм рельєфу використовується під час інженерно-геологічних і гідрогеологічних досліджень, пошуків води, проєктування гідротехнічних споруд та інших робіт.

Гідрографічна мережа. До цього індикатора геологічних об'єктів відносять ерозійну мережу – від великих річок до форм первинного стоку (озер і боліт). За роллю в геологічному дешифруванні, гідрографічні індикатори в зв'язку з їх великою стійкістю тісно прилягають до основних ознак. Річкова мережа на космофотознімках розізнається досить детально – до п'ятого або шостого порядку (залежно від масштабу знімків). Крім власне річкової мережі, на космофотознімках є можливість встановити не тільки тип, але й форму річкових долин, границь водозборів і басейнів річок, сліди перехоплення русел і меандрування[14] (рис. 13.11), відрізнити прозорі річки від каламутних і забруднених, для яких характерний і більш світлий тон.

Рис. 13.11. *Меандр*

Форми первинного стоку – потяжини[15], улоговини і балки в рівнинних районах, відповідно до ухилу топографічної поверхні, можуть підкреслювати характер геологічної будови, розривні і складчасті структури, свідчити про ступінь водопроникності порід і прояв деяких сучасних процесів.

Дані про склад відкладень, що прорізаються ерозійною мережею, можна отримати із аналізу поперечного профілю долин.

---

[14] **Меандрування** – тип руслових процесів, у вигляді послідовних стадій звиватості річного русла. Термін "меандрування" пішов від назви ріки Великий Мендерес (у минулому – Меандр) на південному заході Туреччини, яка характеризується значною звивистістю.

[15] **Потяжина** – дрібна коротка улоговина, куди надходить вода з невеликої водозбірної поверхні.

Аналіз мережі ярів, балок, дрібних річкових долин і будови, профілю, характеру розташування в плані може дати відомості щодо визначення контролю корінними породами.

У результаті численних досліджень встановлено, що найголовніші типи порід і тектонічних форм характеризуються своїм специфічним рисунком гідромережі.

За особливостями рисунка ерозійної мережі і перегинами поперечного профілю можна робити висновки про склад гірських порід. Велика кількість малих озер і боліт може свідчити про наявність водотривких відкладень. Зміна глибини ерозійного урізку річкових долин і русел, висоти терас і поведінка річкових русел (спрямлені ділянки, підвищене меандрирування, наявність порогів і перекатів на окремих ділянках долин) і локальні зміни густоти ерозійного розчленування, характеру розгалуження приток і типу рисунка, перехвати русел, розташування приток, зворотне основному руслу – ці та інші відомі ознаки контролю тектонічної будови можуть вказувати на наявність порушень у заляганні порід.

Локальний розвиток процесів заболочування або деградації боліт свідчить про тенденції сучасного опускання або пониження даної ділянки. Прямолінійні ділянки великих озер, морського узбережжя, місцеві зміни висоти берегових уступів і терасових рівнів можуть бути обумовлені тектонічними причинами.

Геоморфологічні ознаки. Міцність порід і їх стійкість до процесів вивітрювання відіграють значну роль при формуванні макро- і мікроформ рельєфу. Велике значення мають тріщинуватість порід, їх тектонічна порушеність, яка визначає характер і густину річкової і яружно-балочної мережі. Чітко прослідковуються лінійні перевищення в рельєфі, що виникають над міцними жилами і дайками тощо.

Формування макро- і мікрорельєфу тісно пов’язане з властивостями порід, їх ступенем порушення, тріщинуватістю. Відособлені типи рельєфу характерні для порід із певними фізичними та структурними властивостями. На цій основі можливо виділяти ареали розповсюдження одновікових товщ або порід, близьких за складом і генезисом, простежувати за простяганням окремі шари, пачки або світи навіть за відсутності відшарувань цих порід. Найбільш інформативні в цьому відношенні лінійні позитивні чи негативні форми рельєфу (опуклі по відношенню до площини горизонту – позитивні, ввігнуті – негативні). Позитивні зазвичай виникають над кварцовими жилами, дайками. Негативні характерні для зон тріщинуватості, розломів, дайкових тіл, які мають меншу стійкість до процесів вивітрювання порівняно з вміщувальними породами.

Рослинність. Використання цієї ознаки засновано на тому, що окремі види рослин і рослинних угруповань розвиваються на ґрунтах певного складу. Ця ознака може бути використана для виявлення ділянок розповсюдження шарів, лінз і товщ вапнякових порід. Найбільшу інформативність рослинність, як непряма ознака, має при дешифруванні в умовах розчленованого рельєфу й горизонтального залягання порід.

Тісний зв’язок рослинності із середовищем, її активна реакція на умови перебування і вибіркове відношення рослин до поживних речовин дозволяють використовувати як показники середовища. Це ґрунтується на існуванні певного взаємозв’язку між корінними породами, ґрунтовим покривом і рослинністю.

Залежно від об'єкта індикації виділяються групи рослин – індикаторів ґрунту, клімату, корінних порід, зволоженості тощо. Виходячи з цього, рослинність може бути показником різних типів відкладень (пухких і корінних), підкреслювати розривні порушення і тріщинуватість, крупні структури, зволоженість і гідрогеологічні особливості.

Деревна, чагарникова і трав'яниста рослинність часто розташовується вибірково на ґрунтах різного складу. Наприклад, на сильно вапнякових ґрунтах трав'яниста рослинність рідка або взагалі відсутня, проте непогано ростуть чагарники. Ця ознака дозволяє легко виявити шари і лінзи карбонатних порід.

Ґрунти. Ґрунти як самостійні природні тіла при геологічному дешифруванні можуть виконувати певну індикаційну роль. Підставою для використання ґрунтів як індикаторів слугує їх тісний зв'язок із материнською гірською породою, вплив якої позначається на кольорі ґрунтів, їх механічному складі, характері ґрунтового скелета, потужності, вологості, в хімічному складі. Перераховані властивості визначають їх спектральну яскравість, а отже, і характер зображення на знімках. Індикаційна роль ґрунтів більш істотно проявляється в аридних зонах або в періоди відсутності рясної рослинності в гумідних.

Аридні зони лат. *aridus* – сухий) **– *пустельні і напівпустельні зони з посушливим, або аридним, кліматом.***

Аридні зони утворюються внаслідок аридизації – складних кліматичних змін, що призводять до зниження зволоженості територій.

Основними індикаторами ґрунтів є їх колірні відтінки, які проявляються на знімках у використанні фототону.

Забарвлення ґрунтів залежить головним чином від літологічних особливостей вихідних порід, особливо якщо ґрунти залягають безпосередньо на корінних породах або на їх елювії. Основне значення тут мають їх кольорові відтінки, які проявляються на знімках зміною фототональності. Забарвлення товщ залежить від складу вихідних порід, механічного стану, зволоженості і засоленості. Солончакові ґрунти мають нерівне плямисте забарвлення. Для піщаних ґрунтів притаманний крапчастий і хвилястий рисунок. Леси, суглинки дають рівне монотонне зображення.

Ступінь зволоження дуже сильно впливає на видовий склад і густоту рослинності, зокрема трав'янистої, що в умовах сухих степів може слугувати важливою ознакою дешифрування. Максимальний ефект від використання ступеня зволоженості ґрунтів досягається при дешифруванні розривних порушень та інших проникних ділянок земної кори. Для цього можна застосовувати і водні джерела. За їх виходами можуть бути дешифровані такі межові геологічні поверхні, як розриви, незгідності, водоупори тощо.

Наведений вище перелік непрямих дешифрувальних ознак не є вичерпним. Більш того, непрямими ознаками можуть виступати також і такі об'єкти, зв'язки яких із досліджуваним явищем на перший погляд не є очевидними. Так, наприклад, неодноразово відзначалось утворення лінійних гряд купчастих хмар над великими тектонічними розломами. Польові геофізичні дослідження засвідчили, що по таких розломах піднімаються додаткові потоки тепла, що й пояснює утворення хмарності, яка, таким чином, може виступати як індикатор розломів.

13.6. Вплив природних умов зйомки на ефективність дешифрування

Можливість отримання певного об'єму геологічної інформації за результатами дешифрування МДЗ визначається не тільки фаховою підготовкою дешифрувальника, але й геологічною будовою місцевості дослідження та факторами географічного середовища

Кліматичні умови. В сухому напівпустельному кліматі можна розрізнити дрібні форми рельєфу. Це спричинено тим, що при малопотужному покриві четвертинних відкладів на поверхні чітко проявляються всі риси геологічної будови. На рівнинах із потужним покривом рослинності дешифрування знімків ускладнено.

У загальному вигляді відслоненість території пропорційна ступеню дешифрованості. Найбільш ефективно дешифрування відбувається в районах складної геологічної будови, що зумовлено значними відмінностями зображень різних геологічних об'єктів.

Рослинний покрив найчастіше приховує, маскує геологічні структури, ускладнює дешифрування. Коли рослинне угруповання розповсюджене на відповідних формах рельєфу або породних різновидах, то вплив рослинності позитивний. Крім того, трав'яний покрив, змінюючись у сезоні, часто сприяє контрастності фотозображення ландшафту і поліпшує фотогенічність об'єктів.

Новітні континентальні утворення (делювіальні, еолові, льодовикові тощо) часто повністю перекривають корінні породи, утруднюючи і навіть виключаючи можливість їх дешифрування. Разом з тим у низці випадків структури корінних порід виразно просвічують під покровом пухких утворень, практично не знижуючи фотогенічності.

Антропогенні чинники негативно впливають на дешифрування геологічних структур. Так наприклад, оранка землі порушує природні зв'язки між мікрорельєфом, забарвленням ґрунтового шару, рослинністю і геологічною будовою**.**

Питання для самоконтролю

1. Що розуміють під дешифруванням матеріалів дистанційного зондування?

2. Наведіть класифікацію видів (методів) дешифрування.

3. Дайте характеристику візуального дешифрування.

4. Дайте характеристику автоматичного і автоматизованого дешифрування.

5. Охарактеризуйте інформативні властивості МДЗ.

6. Охарактеризуйте прямі дешифрувальні ознаки МДЗ.

7. Охарактеризуйте непрямі дешифрувальні ознаки МДЗ.

8. Охарактеризуйте вплив природних умов зйомки на ефективність дешифрування.

XIV. ТЕМАТИЧНА ОБРОБКА ЗНІМКІВ

Основна мета використання даних ДЗЗ – витяг із них корисних і актуальних даних, які використовується для складання топографічних та тематичних карт, інвентаризації земель, еколого-географічної оцінки територій, досліджень динаміки природних і антропогенних об'єктів та явищ, створення оперативних і прогнозних карт тощо. Цілком очевидно, що подальший прогрес у розвитку наук про Землю буде нерозривно пов'язаний із використанням матеріалів ДЗЗ і вдосконаленням технологій їх обробки.

Ефективність використання дистанційних МДЗ залежить не тільки від картографо-фотограмметричних особливостей вихідного знімка, але й від прийнятої методики роботи з ними і використовуваних методів обробки.

Усю розмаїтість методів обробки зображень ДЗЗ поділяють на дві основні групи:

1) покращення (попередня обробка, корекція, реставрація) зображень, які забезпечують перетворення знімків та спрямовані на полегшення візуального дешифрування, підвищення його об'єктивності і достовірності, а також підготовку знімків до наступного автоматизованого дешифрування і створення карти;

2) тематична обробка зображень (витяг інформації із зображень ДЗЗ). Це передусім методи автоматизованого дешифрування – класифікації об'єктів за знімками з використанням апріорної інформації про ознаки класів, що виділяються, або без неї.

14.1. Загальні відомості про тематичну обробку супутникових знімків

Тематична обробка супутникових знімків – це процес дешифрування або розпізнавання об'єктів і явищ на супутникових знімках. Повноцінний процес обробки зображень передбачає проходження через певні складні етапи, кожен з яких включає в собі види та способи реалізації цих етапів [102]. Це дозволяє отримати весь масив корисної інформації про об'єкт дослідження.

Узагальнену схему тематичної обробки зображень в ДЗЗ подано на рис. 14.1. Серед способів тематичної обробки виділяють:

– принцип синтезу (перетворення) кольору;
– аналіз головних компонентів;
– метод спектрального поділу (спектральне розділення);
– класифікації;
– індексні зображення;
– визначення кількісних показників.

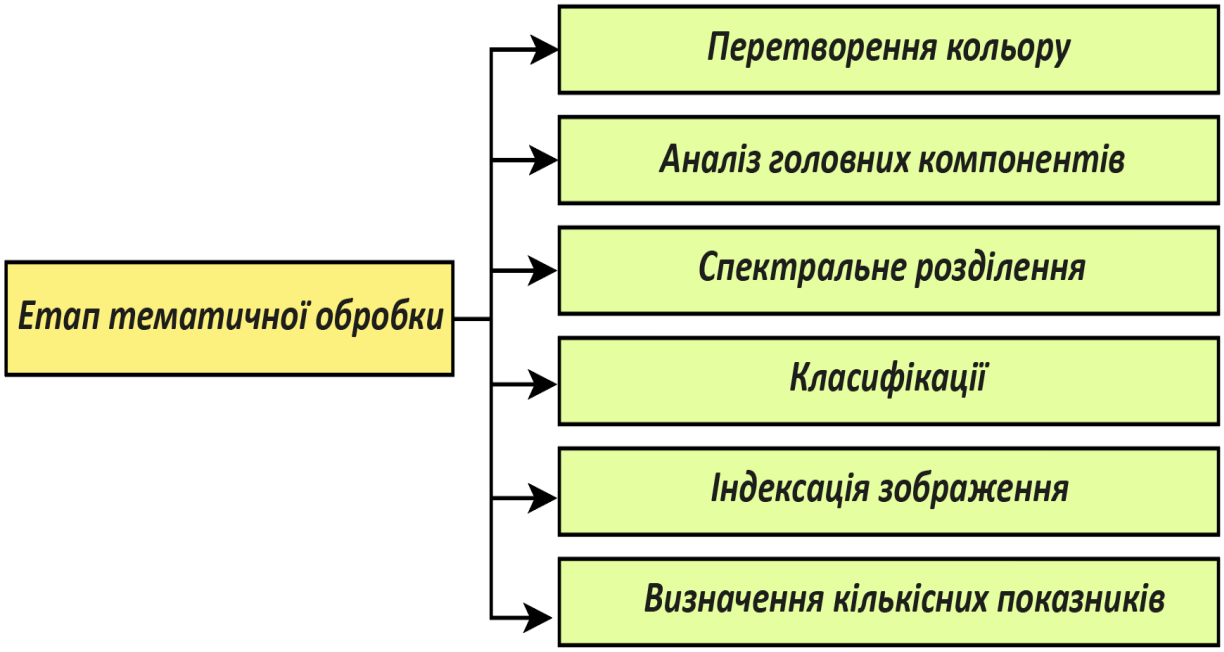


Рис. 14.1. *Узагальнена схема тематичної обробки зображень у ДЗЗ*

14.2. Принцип синтезу кольору

Оскільки людський зір розрізнює кольори значно краще, ніж відтінки сірого кольору, то сприйняття і дешифрування квантованих знімків можна додатково покращити заміною чорно-білої шкали яскравостей кольоровою, тобто присвоїти виділеним рівням (ступеням) яскравості певні кольори.

Перетворення кольору дозволяє візуально виділяти об’єкти, які мало відрізняються за яскравістю на півтоновому зображенні. Цей процес передбачає фарбування зображення в натуральні і неприродні кольори [51]. Якщо в канали R, G, B зображення підставлені значення R, G, B каналів знімка, то зображення подано в натуральних кольорах. Якщо в канали R, G, B зображення підставлені інші канали знімка, то зображення подано в неприродних кольорах. Наприклад, у канал зображення R підставити канал знімка, в якому значення яскравості пікселів високі, а в канали G і B – канали з низькими значеннями яскравості, то зображення буде забарвлене переважно в червоні тони. Таким чином, самі об’єкти доцільно визначати на зображеннях у натуральних кольорах, а проводити їх розділення чи виділення контуру зручніше на зображеннях у неприродних кольорах [63; 42].

Кольорокодування виявляється доцільним, якщо кількість рівнів яскравості на квантованому зображенні більша 10 (однак не перевищує 30).

Процес отримання різних кольорів за допомогою декількох основних (первинних) випромінювань або фарб називається кольоровим синтезом.

Принцип синтезу кольорового знімка полягає в тому, що зображенню в кожному із знімальних каналів присвоюється свій колір.

Існує два принципово відмінні методи синтезу кольору: *адитивний* і *субтрактивний*.

При адитивному (англ. *addition* – додавання) синтезі первинні випромінювання (кольори) змішуються (підсумовуються), внаслідок чого отримуються нові додаткові кольори або відтінки (рис. 14.2, *а*).

Первинними можуть виступати два, три і більше різних за кольором випромінювань. Найбільш поширений триколірний адитивний синтез, основними випромінюванями якого є сині, зелені і червоні кольори, тобто випромінювання трьох основних зон спектра.

При субтрактивному методі відбувається "віднімання" з білого кольору відповідних випромінювань (блакитного, пурпурового, жовтого) за допомогою світлофільтрів для отримання бажаних кольорів (рис. 14.2, *б*).

а) *б)*

Рис. 14.2. *Методи синтезу кольору:*
а) адитивний; б) субтрактивний

Існує декілька моделей формування кольорового зображення, найбільш поширеними з яких є RGB, CMYK та HSB.

Колірна модель RGB *(**R**ed, **G**reen, **B**lue – червоний, зелений, синій)* – адитивна модель, яка описує фізику синтезу променів. Найчастіше для синтезу використовуються зони спектра 0,6–0,75, 0,5–0,6 і 0,4–0,5 мкм. За основні прийняті кольори, що відповідають монохроматичним випромінюванням із довжиною хвилі 0,7 мкм (червоний – *R*); 0,5461 мкм (зелений – *G*); 0,4358 (синій – *B*). Таке подання кольору називають *колірною моделлю RGB*. Цей варіант синтезу називають *стандартним* або *натуральною кольоропередачею*.

У файлі кольорового зображення для кожного пікселя записуються числа, які означають інтенсивності трьох основних кольорів, діапазон значень від 0 до 255. Наприклад, якщо значення яскравості $R = 250$, $G = 0$, $B = 0$, то піксель буде забарвлений червоним кольором (рис. 14.3).

Якщо значення яскравості будуть однакові між собою $R = G = B$, то піксель буде забарвлений сірим кольором. Якщо значення яскравості *R, G, B* різняться між собою, то залежно від значень яскравості *R, G, B* піксель буде забарвлений у певний колір (рис. 14.4).

Шляхом змішування трьох кольорів у визначених пропорціях можна одержати всі кольори.

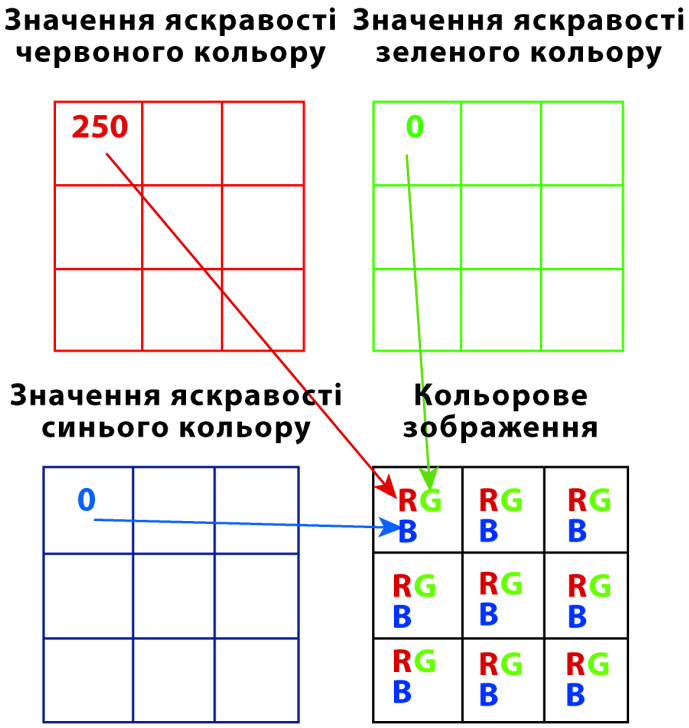


Рис. 14.3. *Приклад формування червоного забарвлення пікселя*

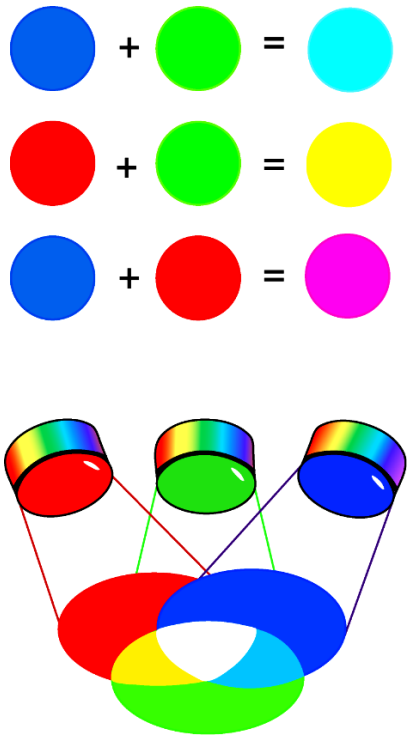


Рис. 14.4. *Формування забарвлень пікселів*

Колірна модель CMYK (скорочено від англ. Cyan, Magenta, Yellow, BlacK color). Це субтрактивна модель, яку використовують здебільшого для підготовки друкованих зображень, оскільки у разі її використання за допомогою чотирьох фарб можна отримати повноколірне зображення (рис. 14.5).

Це стає можливим завдяки властивості людського ока усереднювати колір маленьких і близько розташованих об'єктів. Тому якщо дуже близько або з накладанням одна на одну нанести на папір пурпурові і жовті точки, око сприйматиме їх як зону червоного кольору. Друкуючи у такий спосіб точки чотирьох базових кольорів, можна отримати більшість існуючих кольорів.

Колірна модель HSB. У моделі HSB при створенні повних кольорів виступають відтінок (*H*), насиченість (*S*) і яскравість (*B*). Ця модель найбільш відповідає людському сприйняттю кольорів (рис. 14.6).

Колірний тон – колір, що відбивається від об'єкта або проходить крізь нього. Колірний тон – це наявність в одному кольорі домішок іншого. Тон характеризує відміну одного кольору від іншого.

Вимірюється як місце на стандартному колірному колі, що виражається у градусах від 0° до 360°. Зазвичай колірний тон ототожнюється із назвою кольору, наприклад, червоний, помаранчевий або зелений.

Насиченість. Насиченість або чистота кольору (іноді називається *колірність*) – це обсяг сірого пропорційно до колірного тону, що визначається у відсотках від 0 (сірий) до 100 (повністю насичений колір). На стандартному колірному колі насиченість збільшується від центра до краю.

Яскравість. Відносна яскравість або темність кольору, як правило, визначається у відсотках від 0 (чорний) до 100 (білий).

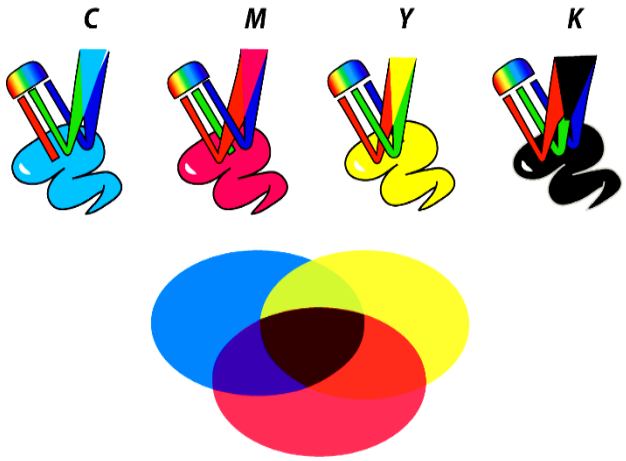


Рис. 14.5. *Формування субтрактивних кольорів (CMYK)*

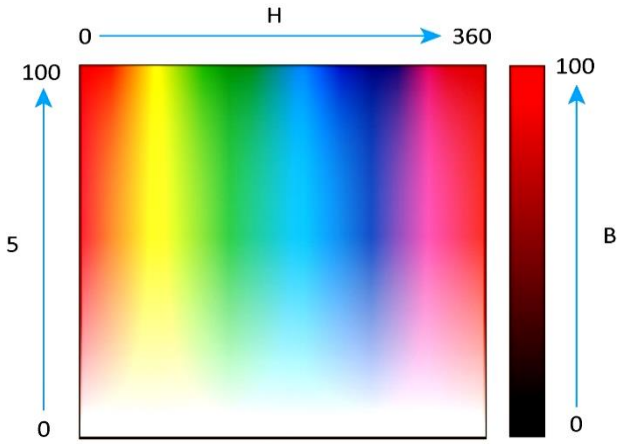


Рис. 14.6. *Формування колірної моделі HSB*

Колірні перетворення. Якщо вивести на екран дисплея зображення одного каналу багатоспектрального каналу знімка, то він буде забарвлений у сірий тон (напівтонове зображення). Щоб отримати кольорове зображення, потрібно скласти докупи три канали багатоспектрального знімка, один з яких буде червоний (*R*), другий зелений (*G*), третій синій (*B*) (рис. 14.7) [116].

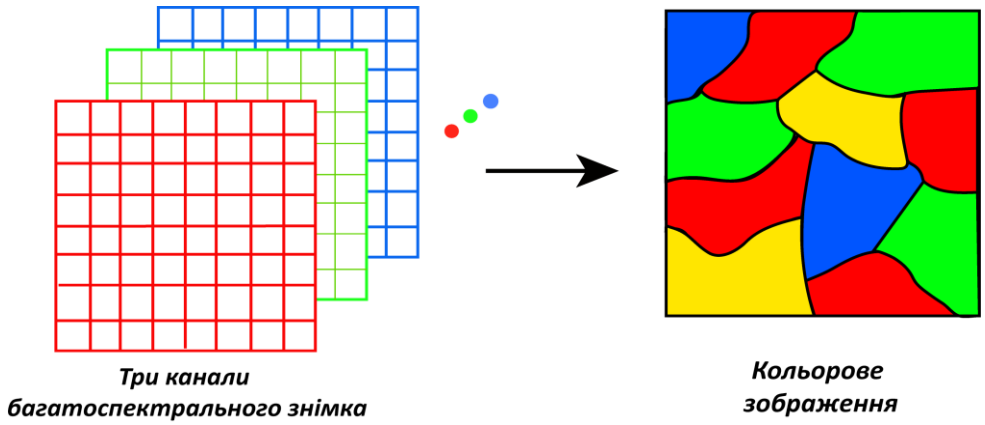


Рис. 14.7. *Приклад формування кольорового зображення*

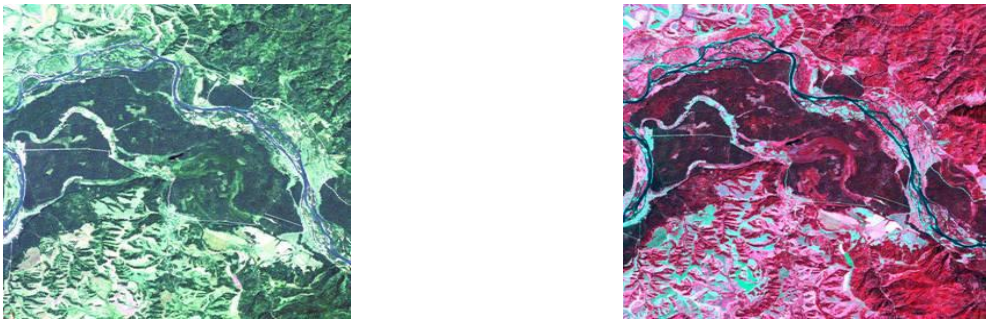
Зображення можна забарвлювати в натуральні і хибні кольори. Натуральні кольори відтворюють реальні кольори об'єктів, як вони виглядають у природі, а хибні кольори використовуються для виділення певних деталей, створення художнього ефекту або у наукових візуалізаціях, де кольори можуть вказувати на різні властивості.

Якщо в канали *R, G, B* зображення підставлені *R, G, B* канали знімка, то зображення подається в натуральних кольорах. Якщо ж в канали *R, G, B* зображення підставлені інші канали знімка, то зображення буде подано в хибних кольорах (рис. 14.8).

Механізм підбору кольорів зображення. Якщо в канал зображення *R* підставити канал знімка, в якому значення яскравості пікселів високі, а в канали *G* і *B* –

канали з низькими значеннями яскравості, то зображення буде забарвлено переважно в червоні кольори тощо.

Кольоропередачу, близьку до натуральної, можна отримати, якщо комбінацію знімальних каналів та кольорів змінити і привласнити інфрачервоній зоні зелений колір.



а) *б)*

Рис. 14.8. *Забарвлення зображення:*
а) натуральні кольори; б) хибні (синтезовані) кольори

Приклад забарвлення знімка в натуральні кольори подано в табл. 14.1.

Таблиця 14.1

Приклад забарвлення знімка в натуральні кольори

Канали зображення	Спектральні канали знімка	Колір води на зображенні	Колір рослинності на зображенні	Колір ґрунту на зображенні
R G B	Червоний Зелений Синій	Синій	Зелений	Коричнево-сірий

Приклад забарвлення знімка в хибних кольорах подано в табл. 14.2.

Сутності об’єктів доцільно визначати на зображеннях у натуральних кольорах, а розділяти й оконтурювати об’єкти зручніше на зображеннях у хибних (синтезованих) кольорах. Правильно підібрана шкала дозволяє оператору візуально виділяти об’єкти, які мало відрізнялися за яскравістю на напівтоновому зображенні.

Таблиця 14.2

Приклад забарвлення знімка в хибні кольори

Канали зображення	Спектральні канали знімка	Спектральні канали знімка	Колір рослинності на зображенні	Колір ґрунту на зображенні
R G B	Ближній ІЧ Червоний Зелений	Чорний	Червоний	Сіро-блакитний

14.3. Спектральні перетворення

Сучасні системи ДЗЗ забезпечують можливість одержання зображень однієї території в різних спектральних діапазонах, з різним просторовим розрізненням і в різний час. При цьому актуальними є завдання спільного аналізу цих даних з метою розв'язання задач дешифрування і класифікації спостережуваних об'єктів.

Комплексна обробка даних, отриманих у різних каналах (спектральних зонах, видах поляризації), може здійснюватися двом шляхами:

1) роздільною обробкою зображень специфічними для кожного каналу методами з наступним суміщенням в одному зображенні всієї отриманої інформації;

2) спільним аналізом даних, отриманих в оптичному, інфрачервоному, радіо- і НВЧ-діапазонах.

Первинною дешифрувальною ознакою об'єктів на цифровому космічному зображенні є інтенсивність пікселя. Формування похідних дешифрувальних ознак можливе за рахунок спільної обробки вищеперерахованих даних. Похідні дешифрувальні ознаки формуються шляхом виявлення і формалізації спектральних, структурних, текстурних та контекстних властивостей об'єктів різних класів.

Попередньо було показано, що дані багатозональної зйомки можуть бути представлені векторами P у K-вимірному спектральному просторі. Таким чином, елементами простору вихідних даних є значення інтенсивності (яскравості) пікселів $P_k(i,j)$.

Результат просторового або спектрального перетворення вихідного простору даних у контексті класифікації об'єктів називають простором ознак [116; 53].

Основна ідея підходу, що застосовується при комплексній обробці, полягає у формуванні із вихідних даних, отриманих в різних каналах, нового зображення за рахунок переходу від попіксельної обробки зображень по яскравісному полю до принципово нового поля ознак.

Важливо зазначити, що простір ознак не містить у собі нової інформації про об'єкти, вони тільки дозволяють подати вихідні дані в більш зручному вигляді. Тому мета спектральних перетворень простору даних – одержання простору ознак, що має певні переваги перед вихідним спектральним простором, який дозволяє підвищити ефективність інтерпретації досліджуваних об'єктів.

Таким чином, *сутністю спектральних перетворень є перехід від простору даних до простору ознак*. Особливість цих перетворень – прагнення до пониження розмірності простору ознак порівняно з простором даних. В ідеалі – перехід до однієї інтегральної ознаки. Перспективи розв'язку цієї задачі пов'язані з розробкою універсальних перетворень, що дозволяють виявити структуру даних і відійти від аналізу властивостей одного пікселя до поняття околиці точки, текстури досліджуваної ділянки.

Формування простору ознак на основі спектральних перетворень передбачає процес аналізу зображення, при якому до уваги береться кореляція різних каналів одержання даних ДЗЗ, надлишковість вихідних даних, модель досліджуваної текстури, прогнозування її поведінки у часі. Це передбачає використання багатого

арсеналу розроблених алгоритмів і методів, серед яких розрахунок вегетаційних індексів, аналіз головних компонент, фрактальна обробка зображень, алгоритми злиття зображень та низка інших.

14.3.1. Індексні зображення

Однією з перших похідних ознак, заснованих на спектральних перетвореннях, стало відношення інтенсивностей кожного пікселя в двох спектральних каналах

$$R_{i,j}(i,j) = \frac{P_i(i,j)}{P_k(i,j)} \quad . \tag{14.1}$$

Після калібрування даних у кожному каналі з урахуванням впливу атмосфери, параметрів сонячного освітлення, коефіцієнта посилення і зміщення нуля сенсора спектральне відношення (14.1) стає пропорційним відношенню коефіцієнтів відбиття, тобто є характеристикою спектрального контрасту між двома спектральними зонами *l* і k:

$$R_{l,k}(i,j) = \frac{\rho_i(i,j)}{\rho_k(i,j)}. \tag{14.2}$$

Використання спектральних відношень як ознак класифікації засновано на аналізі спектральних кривих – залежностей коефіцієнта відбиття або коефіцієнта спектральної яскравості від довжини хвилі для різних типів поверхонь. Так, спектральні відношення ближнього інфрачервоного діапазону до червоного можуть підкреслювати відмінності інтенсивності відбиття від рослинності і ґрунту.

Тому спектральні відношення, що засновані на аналізі даних ближнього інфрачервоного і червоного каналів, отримали назву вегетаційних індексів. Для розв'язання задач оцінки характеристик зеленої рослинності, ґрунтів, ідентифікації основних природних утворень розроблена велика кількість вегетаційних індексів [116]: RVI (відносний), NDVI (нормалізований різницевий), PVI (ортогональний), SAVI (ґрунтовий), ARVI (стійкий до впливу атмосфери) тощо.

Велика кількість індексів обумовлюється бажанням повною мірою використовувати відомі знання про залежності від довжини хвилі відбивної здатності різних ґрунтово-рослинних покривів у конкретних регіонах, переходячи від вихідних спектральних яскравостей до їх комбінацій. При цьому одні комбінації використовують для розрізнення типів рослинності, водних об'єктів, заболоченнях земель, орних ґрунтів, а інші – для зменшення впливу атмосфери, ідентифікації хмарних полів і тіней від них тощо [122].

Відносний вегетаційний індекс RVI (просте зональне відношення):

$$RVI(i,j) = \frac{\rho_{\text{БІЧ}}(i,j)}{\rho_{\text{черв}}(i,j)}. \tag{14.3}$$

Для пікселів, що відповідають зображенню геологічних структур і ґрунтів, відношення (19.3) наближене до 1, а для рослинного покриву може досягти 2 і більше. В координатах $\rho_{КР} - \rho_{БІЧ}$ лінія ґрунтів є прямою, що проходить через початок координат під кутом 45° (рис. 14.9).

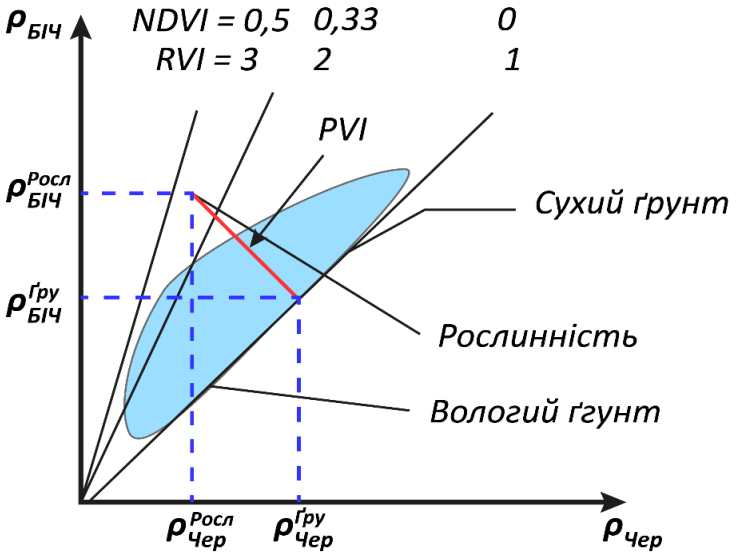


Рис. 14.9. *Ізолінії вегетаційних індексів RVI, NDVI і значень вихідних даних у видимому червоному і ближньому інфрачервоному каналах [116]*

Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) – один із найбільш розповсюджених індексів для розв'язку задач, що використовують кількісні оцінки рослинного покриву. Є показником кількості фотосинтетично активної біомаси. Визначається виразом:

$$NDVI = \frac{\rho_{БІЧ} - \rho_{черв}}{\rho_{БІЧ} + \rho_{черв}} = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}. \qquad (14.4)$$

Значення цієї величини можуть змінюватись у діапазоні від −1 до +1. Розрахунок NDVI базується на двох найбільш стабільних (що не залежать від інших факторів) ділянках спектральної кривої відбиття судинних рослин. У червоній зоні спектра (0,6–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин, а в інфрачервоній зоні (0,7–1,0 мкм) знаходиться ділянка максимального відбиття клітинних структур листка. Таким чином, висока фотосинтетична активність (пов'язана, як правило, з густою рослинністю) веде до меншого відбиття в червоній зоні спектра і до більшого − в інфрачервоній.

Відношення цих показників один до одного дозволяє відділяти рослинність від інших природних об'єктів та аналізувати її. Використання ж не простого відношення, а нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відбиття збільшує точність виміру, дозволяє зменшити вплив таких явищ, як відмінності в освітленості знімка, хмарність, серпанок, поглинання радіації атмосферою тощо. NDVI може бути розрахований на основі будь-яких знімків високого, середнього або низького розрізнення, що мають спектральні канали в червоному (0,55–0,75 мкм) і

ближньому інфрачервоному діапазоні (0,75–1,0 мкм). У табл. 14.3 наведені комбінації каналів камер супутників, що використовуються для розрахунку NDVI.

Таблиця 14.3

Спектральні діапазони для розрахунку NDVI *[52]*

Супутник	*Спектральний діапазон, мкм*
MSS Landsat (4,5)	***5** (0,6–0,7), **6** (0,7–0,8) або **7** (0,8–1,1)*
TM Landsat (4,5)	***3** (0,63–0,69), **4** (0,76–0,90)*
ETM + Landsat 7	***3** (0,63–0,69), **4** (0,75–0,90)*
AVHRR NOAA	***1** (0,58–0,68), **2** (0,72–1,0)*
MODIS Terra (Aqua)	***1** (0,62–0,67), **2** (0,841–0,876)*
ASTER Terra	***2** (0,63–0,69), **3** (0,76–0,86)*
LISS IRS(1C/1D)	***2** (0,62–0,68), **3** (0,77–0,86)*

Іншим часто використовуваним індексом є ортогональний вегетаційний індекс – PVI:

$$PVI(i,j) = \left[\left(\rho_{\text{черв}}^{\text{грун}} - \rho_{\text{черв}}^{\text{росл}}\right)^2 + \left(\rho_{\text{БІЧ}}^{\text{грун}} - \rho_{\text{БІЧ}}^{\text{росл}}\right)^2\right]^{1/2}. \qquad (14.5)$$

Річ у тому, що, як уже зазначалося, в координатах яскравостей двох каналів $\rho_{черв} - \rho_{БІЧ}$ дані, що відносяться до розорених ґрунтів, розташовуються вздовж прямої. Геометрично ортогональний вегетаційний індекс є довжиною перпендикуляра, опущеного із заданої точки на "лінію ґрунтів" у двовимірному просторі значень інтенсивностей пікселів у видимому червоному і ближньому інфрачервоних каналах (рис. 14.1) [113; 52]

Ізолінії індексу PVI – це прямі, паралельні лінії ґрунтів.

Простота реалізації методів підрахунку вегетаційних індексів призвела до появи цього інструментарію в більшості програмних продуктів обробки даних ДЗЗ.

У ПК ENVI 4.7 аналіз спектрозональних зображень із використанням великої бібліотеки спектрів відбитків різних поверхонь, що додається, реалізований у блоці Spectral головного меню (рис. 14.10).

В цьому ПК є можливість розраховувати до 27 різних вегетаційних індексів [105].

В ПК ERDAS Imagine алгоритми розрахунку індексів містяться в модулі Image Interpreter, меню Spectral Enhancement (Спектральні перетворення) пункт Indices [60].

Під час дослідження об’єктів за багатозональними знімками доволі часто виникають ситуації, коли більш важливим є використання не абсолютних значень, а характерних співвідношень між значеннями яскравості об’єкта в різних спектральних зонах.

Одним із поширених методів перетворення багатозональних знімків є визначення *індексів*, тобто перетворення зображень, заснованих на відмінностях яскравості природних об’єктів у двох або декількох частинах спектра.

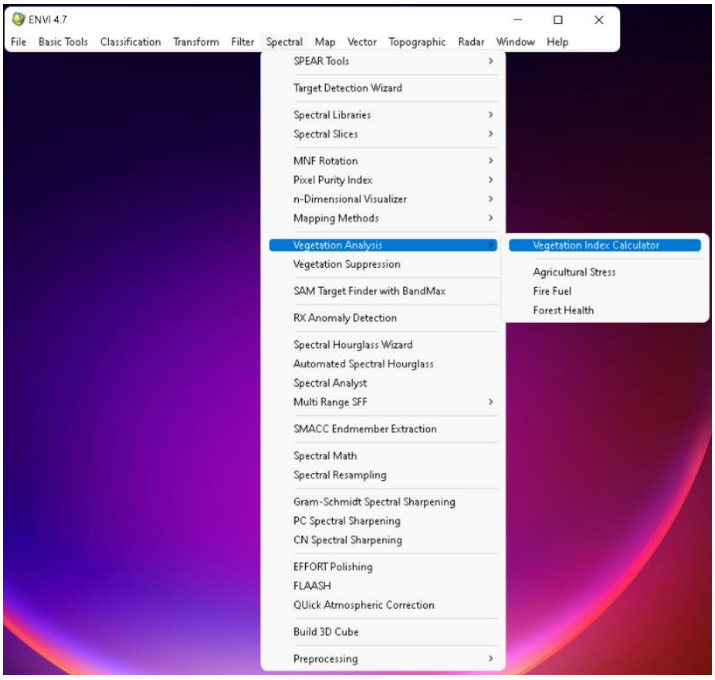


Рис. 14.10. *Аналіз вегетаційних індексів у меню ПК ENVI*

Метод індексних зображень передбачає перерахування значень яскравості для кожного пікселя в різних каналах за допомогою певних математичних операцій на основі арифметичних операцій із значеннями яскравості у різних спектральних зонах (їх складання, віднімання, ділення, множення). Такі операції називають алгеброю зображень [35].

Для отримання індексного зображення значення яскравості кожного пікселя обчислюється шляхом застосування арифметичних операцій над значеннями яскравості цього пікселя із різних каналів знімка. На індексних зображеннях об'єкти дослідження виділяються більш яскраво і контрастно порівняно з вихідним знімком. При цьому аналізовані пікселі вже мають не абсолютні значення яскравості, а набувають нових індексних значень відповідно до колірної матриці.

Найбільша кількість індексів відноситься до дешифрування зеленої, вегетуючої рослинності, відділенню її від зображення або інших об'єктів, у першу чергу від ґрунтового покриву і водної поверхні [122]. На сьогодні існує понад 160 індексів рослинності, але лише невелика їх кількість має суттєве практичне використання (*Vegetation Indices*).

Часто для цих цілей використовують нормалізований різницевий вегетаційний індекс, що розраховується за формулою:

$$NDVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right),$$

де ρ_{NIR} – значення яскравості в ближній інфрачервоній зоні;

ρ_{RED} – значення яскравості в червоній зоні.

Значення індексу змінюються в межах від –1 до +1. Для рослинності характерні додатні значення *NDVI* , і чим більша її фітомаса, тим вони вищі (рис. 14.11).

Рис. 14.11. *Приклад застосування вегетаційного індексу*

На значення індексу впливають також видовий склад рослинності, її зімкнутість, стан, меншою мірою – експозиція і кут нахилу поверхні.

Відомі й інші, більш складні перетворення багатозональних знімків, наприклад, перетворення Каута-Томаса (метод "ковпак із китицею"), метод головних компонент.

14.3.2. Перетворення Каута-Томаса

Перетворення Каута-Томаса (Kaut-Thomas transformation, T-method) передбачає поворот осей тривимірного простору, що відповідають яскравостям цифрового знімка в трьох зонах.

Перетворення Каута-Томаса розроблено для аналізу змін рослинного покриву або міських територій, визначених різними системами супутникових сенсорів. Перетворення ще має назву трансформація Tasseled Cap (Ковпак з китицею) через форму графічного розподілу даних.

В результаті перетворення відбувається таке перегрупування зональних ознак, при якому основна частина інформації виявляється зосередженою в двох ознаках: "яскравість", тобто індекс ґрунту, і "зеленість", індекс рослинності. Останній описує контраст між ближньою інфрачервоною і червоною зонами [24].

Перетворенням Каута-Томаса можна досягти того, що рослинність і ґрунти будуть розрізнятись найкращим чином.

Метод був запропонований в 1976 році Каутом (R. J. Kauth) і Томасом (G. S. Thomas) із Мічиганського науково-дослідного інституту проблем навколишнього середовища, які запропонували логічне пояснення закономірностям, виявленим у даних Landsat MSS по сільськогосподарських полях, як функції життєвого циклу сільськогосподарської культури. У міру зростання сільськогосподарської культури відбувається чистий приріст відбивної здатності в ближньої частини ІК діапазону і її зменшення в червоній зоні, на основі кольору ґрунту [24].

Застосування цієї трансформації було розширено від спостережень за врожайністю до аналізу і картографування рослинності. Також метод розширено для підтримки не тільки Landsat MSS, а й інших популярних супутникових систем, таких як Landsat TM і Landsat ETM +, IKONOS і мультиспектральних сенсорів високої розрізненності QuickBird [24].

Переваги перетворення Tasseled Cap:

1. Забезпечення аналітичного методу визначення і порівняння змін рослинності, ґрунту і штучних об'єктів протягом коротких і довгих періодів часу.

2. Забезпечення аналітичного методу прямого порівняння об'єктів земного покриву за допомогою супутникових знімків, отриманих різними сенсорами.

3. Зменшення обсягу даних із декількох мультиспектральних каналів до трьох основних компонентів: яскравість, рівень зеленого і вологість (або жовтизна покриву для Landsat MSS).

4. Зниження атмосферного впливу і перешкод на зображеннях, підвищення якості аналізу.

Перетворення Tasseled Cap – це окремий випадок аналізу головних компонент, який перетворює дані зображень у нову систему координат з новим набором ортогональних осей. Перетворення "шапка з китицею" передбачає використання яскравості пікселів не менше шести спектральних зон видимого, ближнього й середнього інфрачервоного діапазонів. Значення координат пікселів розраховується шляхом алгебраїчного зваженого додавання яскравості шести спектральних зон [24].

14.3.3. Перетворення методом головних компонент

Метод головних компонент (англ. *principal component analysis, PCA*) **– *спосіб зменшення розмірності даних за рахунок використання укрупнених показників ("головних компонент") при найменшій втраті кількості інформації.***

Метод головних компонент (МГК, англ. *principal component analysis, PCA*) – метод факторного аналізу, який використовує ортогональне перетворення множини спостережень із можливо пов'язаними змінними (сутностями, кожна з яких набуває різних числових значень) у множину змінних без лінійної кореляції, які називаються *головними компонентами*.

Метод головних компонент – один з основних способів зменшити розмірність даних, втративши найменшу кількість інформації.

Метод запропонований Карлом Пірсоном у 1901 році та доповнений і розширений Гарольдом Готелінґом у 1933 р.

Донедавна метод головних компонент ще вважали різновидом факторного аналізу. Сьогодні даний метод відносять до групи самостійних статистико-математичних методів багатомірного аналізу. Застосовуються в багатьох сферах, зокрема в економетриці, біоінформатиці, обробці зображень, для стиснення даних, у суспільних науках.

Вихідним ступенем є кореляційна матриця, на підставі якої з використанням методу головних компонент може бути продовжено аналіз значень спостережуваних ознак. Правильно відібрані у кореляційну модель ознаки пов'язані між собою. Наявність таких зв'язків між ними дозволяє на основі одного фактора

мати інформацію про інший. Існування тісного зв'язку між ознаками дає підставу для виключення однієї з них. Ідея обліку однієї ознаки на підставі другої лежить в основі методу головних компонент.

Із двома ознаками метод головних компонент малоефективний. Його використовують, як правило, при десятках взаємопов'язаних ознак, ставиться мета "набрати" певну частину загальної варіації результативної ознаки мінімальною кількістю змінних, які підбирають доти, поки сума їх дисперсій не досягне заданої частки у дисперсії досліджуваного явища.

Метод головних компонентів виконує такі завдання:

– пошук прихованих закономірностей у зміні явищ. Кількість головних компонентів, виділених у процесі дослідження, буде вміщувати у компактній формі більше інформації, ніж початково виміряні ознаки;

– виявлення ознак, найбільш тісно пов'язаних із головною компонентою. Інакше кажучи, вивчення стохастичного зв'язку між ними (зв'язок, при якому зі зміною однієї змінної змінюється закон розподілу другої);

– прогнозування рівнів досліджуваних явищ на підставі рівняння регресії, яке одержане за інформацією головних компонентів.

Переваги такого методу прогнозування, на відміну від класичного регресійного аналізу, можна пояснити тим, що в модель намагаються включити максимально можливу кількість факторів, які в економічних явищах часто характеризуються істотною корельованістю (мультилінеарністю). Прогноз за такими змінними, як правило, буває неточним. Тому виникає завдання про заміну вихідних взаємопов'язаних змінних сукупністю некорельованих параметрів. Це завдання виконується математичним апаратом – методом головних компонент, який є характеристиками, що побудовані на підставі первинно виміряних ознак.

Недоліком методу головних компонентів слід назвати складність математичного апарату, зумовлену абсолютністю знань теорії ймовірностей, математичної статистики, лінійної алгебри, а також математичного забезпечення електронно-обчислювальної машини. Формальне використання стандартних програм без розуміння математичної суті обчислювальних процедур може призвести до необґрунтованих висновків.

Метод головних компонент – це один із основних способів зменшення розмірності даних при найменшій втраті кількості інформації.

Метод головних компонент для знімків використовують для визначення статистично незалежних похідних ознак об'єктів, а також виокремлення і відображення їх спектрального контрасту.

Перетворення за методом головних компонент виконується поворотом системи координат у просторі вихідних спектральних ознак зі збереженням евклідової відстані між точками. Якщо знімок містить більше трьох спектральних каналів, то можна створити кольорове зображення з трьох головних компонент, оскільки в типовому багатозональному зображенні зазвичай перші два або три компоненти спроможні описати практично все розмаїття спектральних характеристик. Інші компоненти найчастіше схильні до шумових впливів. Відкидаючи ці компоненти, можна зменшити об'єм даних без помітної втрати інформації.

Якщо об’єкти малого розміру і низького контрасту недостатньо добре дешифруються на вихідних знімках, то на зображеннях окремих спектральних компонент виявляються доволі непогано. Таке перетворення здійснюють для серії різночасових знімків, приведених до єдиної системи координат, для виявлення динаміки, яка яскраво проявляється в одній або двох компонентах [69].

Суть методу можна пояснити на прикладі двох спектральних каналів, які показують співвідношення їх значень яскравості. Якщо розподіл значень яскравості в кожній зоні нормальний або близький до нормального, то цей розподіл має вигляд хмари, яку називають у статистиці еліпсом розсіювання. Під час виконання перетворення методом головних компонент осі спектрального простору повертають так, щоб нові осі стали паралельними осям еліпсоїда розсіювання. Таким чином, перша головна компонента буде відповідати найбільшій осі еліпса – напрямку найбільшого розкиду значень яскравості. Друга головна компонента відповідає найбільшому поперечному перерізу еліпса, ортогональному до першої головної компоненти. У n-вимірному просторі кожна наступна головна компонента буде одним із поперечних перерізів еліпса розсіювання, ортогональним до попередніх компонент, і характеризуватиме значення даних, що не враховані попередніми головними компонентами [24].

На рис. 14.12 наведено приклад двовимірного простору спектральних ознак, при зростанні значення в першому каналі зростає значення в другому, що свідчить про високу кореляцію між цими каналами [112].

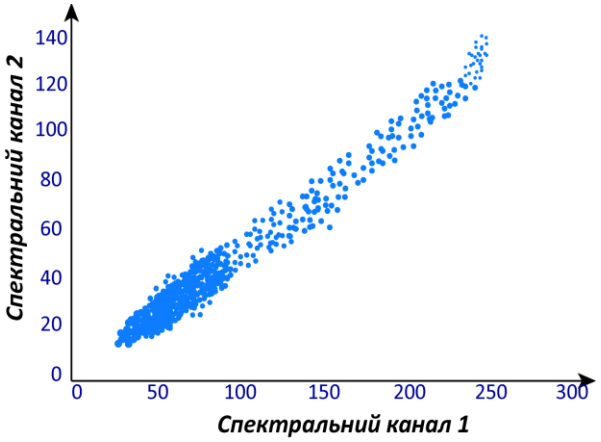
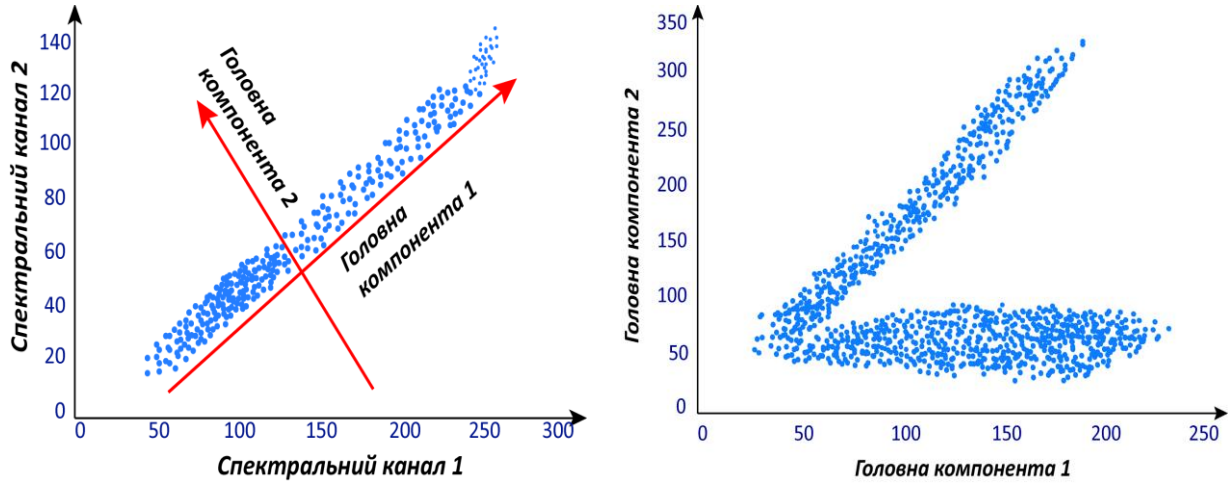


Рис. 14.12. *Приклад кореляції*

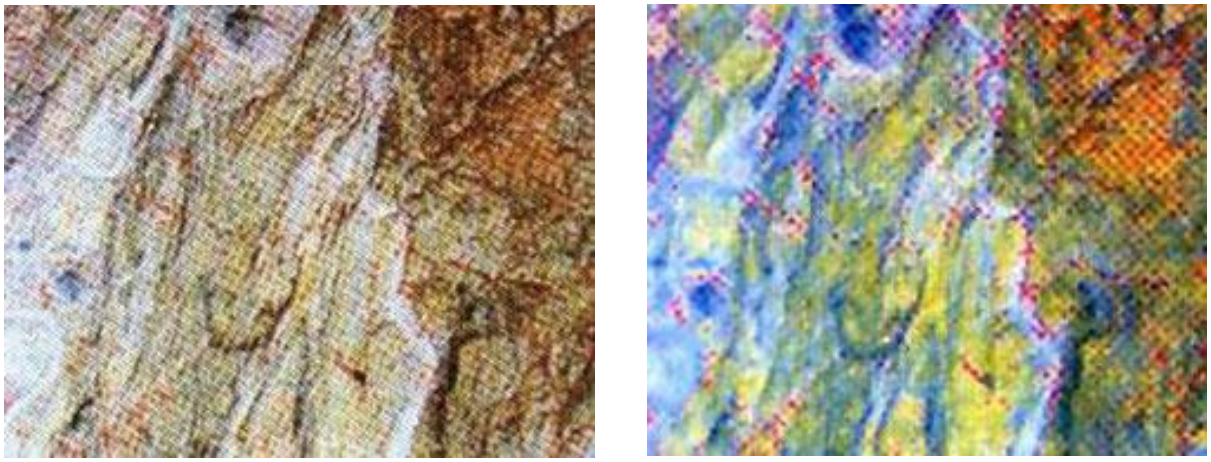
З рис. 14.12 видно, що зона розподілу значень розташована під кутом до осей графіка. Це означає, що при синтезуванні кольорового зображення знімок буде обділений кольорами. Наприклад, усі види рослинності будуть зображуватись відтінками кольору, який важко розрізнити.

Таке розташування значень яскравості характерне для більшості природних об’єктів (рослинності, ґрунтів, гірських порід). Проте якщо осі координат розгорнути так, щоб одна з них йшла паралельно полю розподілу значень, а друга розташовувалась ортогонально (рис. 14.13 *а*), то вздовж кожної з осей діапазон значень буде максимальним (рис. 14.13, *б*), що збільшить можливості дешифрування знімка (рис. 14.14).



а) *б)*

Рис. 14.13. *Приклад збільшення можливостей дешифрування знімка застосуванням методу головних компонент*



а) *б)*

Рис. 14.14. *Оцінка можливостей дешифрування знімка:*
а) поданого в хибних кольорах;
б) при застосуванні методу головних компонент

Можливості аналізу головних компонент:

1. Якщо знімок містить більше трьох спектральних каналів, можна створити кольорове зображення з трьох головних компонент, оскільки в типовому багатозональному зображенні зазвичай перші два або три компонента здатні описати практично всю мінливість спектральних характеристик. Решта компонент найчастіше схильні до шумових впливів. Відкидаючи ці компоненти, можна зменшити об’єм даних без помітної втрати інформації.

2. Якщо дрібні об’єкти низького контрасту погано дешифруються на вихідних знімках, то найчастіше на зображеннях окремих спектральних компонент виявляються добре. Таке перетворення проводять для серії різночасових знімків, приведених в єдину систему координат, для виявлення динаміки, яка яскраво проявляється в одній або двох компонентах [24].

14.3.4. Метод спектрального поділу

Один піксель знімка може відображати від декількох до тисяч квадратних метрів поверхні Землі і містити інформацію не про один об'єкт, а про групу об'єктів, які розташовані на відповідній території.

Метод спектрального поділу (Spectral Unmixing) застосовують для розрізнення на знімках об'єктів, розмір яких значно менший від розміру пікселя.

Суть методу полягає в наступному: змішані спектри аналізують, порівнюючи їх із відомими чистими спектрами, наприклад, із спектральних бібліотек чистих матеріалів [92]. Відбувається кількісна оцінка співвідношення даного відомого (чистого) спектра і домішок у спектрі кожного пікселя. Після виконання такої оцінки може бути отримане зображення, розфарбоване так, що колір пікселя буде означати, який саме компонент переважає в спектрі цього пікселя (рис. 14.15, 14.16).

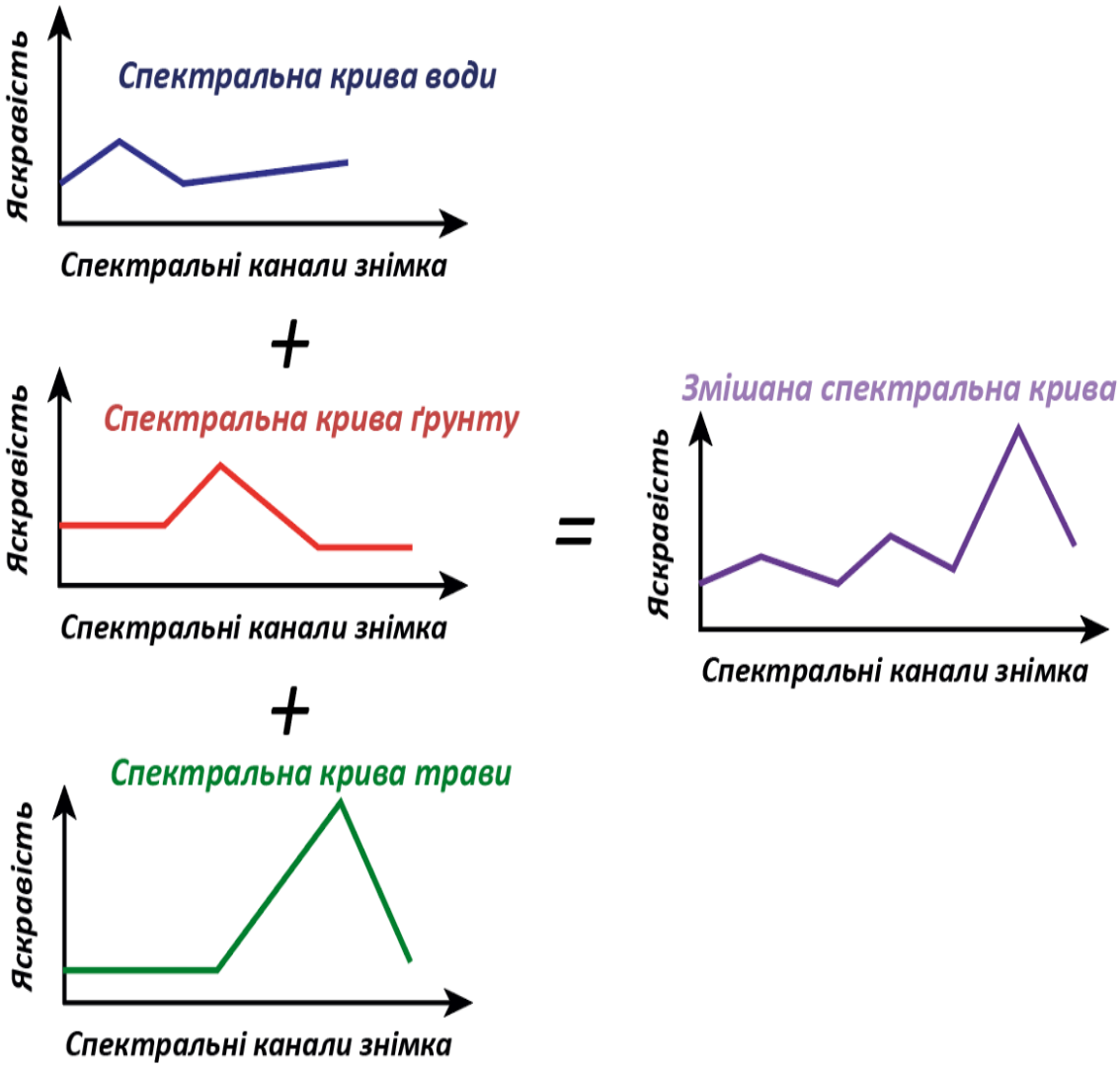


Рис. 14.15. *Приклад використання методу спектрального поділу*

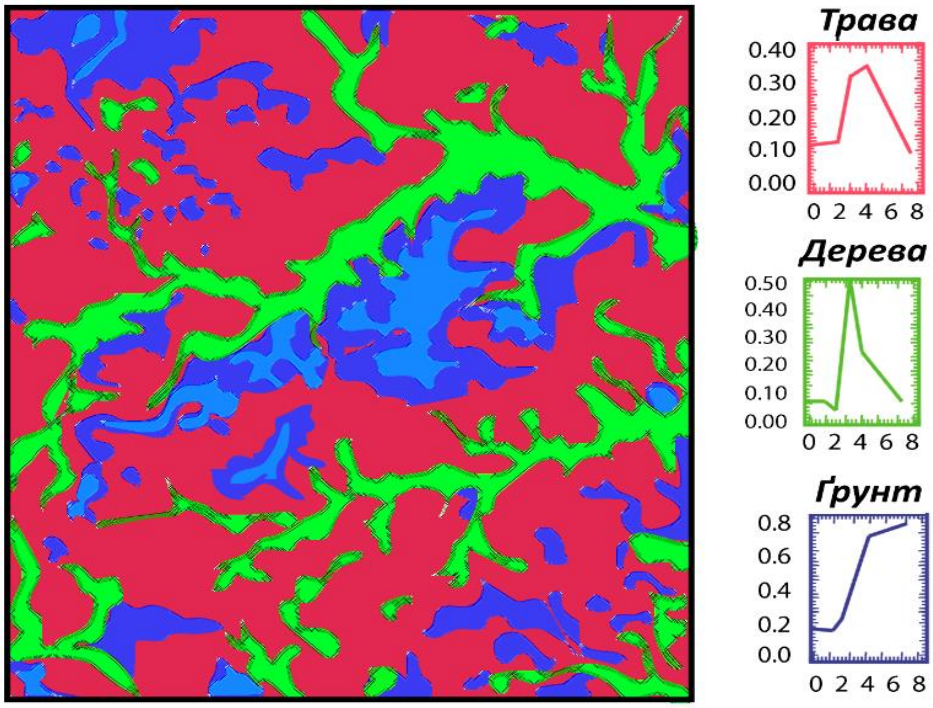


Рис. 14.16. *Приклад зображення, розфарбованого за методом спектрального поділу*

Питання для самоконтролю

1. Що розуміють під кольоровим синтезом?
2. Що розуміють під колірною моделлю RGB?
3. Що розуміють під колірною моделлю CMYK?
4. Що розуміють під колірною моделлю HSB?
5. Що розуміють під індексними зображеннями?
6. Дайте характеристику методу спектрального поділу.
7. Дайте характеристику класифікації в тематичній обробці матеріалів ДЗЗ.
8. Дайте характеристику класифікації з навчанням.
9. Дайте характеристику класифікації без навчання.

XV. МЕТОДИ КЛАСИФІКАЦІЇ В ТЕМАТИЧНІЙ ОБРОБЦІ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ

15.1. Загальні відомості про класифікацію

Класифікація (розпізнавання образів) – поділ досліджуваної сукупності об'єктів на однорідні в певному розумінні групи (класи) або зарахування кожного із заданої множини об'єктів до деякого із заздалегідь відомих класів.

Класифікація цифрових зображень – це процес розпізнавання образів (сортування, розподілу) елементів зображення (пікселів), кожний із яких у загальному випадку описують n-мірним вектором ознак (атрибутами) $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, на кінцеву кількість класів об'єктів (зон зображення).

Ця процедура дозволяє ухвалювати рішення про належність даного зображення або його фрагмента до одного з *n* класів, *n*>1 на підставі наявності ознак того чи іншого класу. Результатом є виділення об'єктів на зображенні, розділених на класи.

Алгоритм класифікації полягає в наступному:

– отримання цифрового зображення (наприклад, за допомогою фотокамери, сканера або іншим способом);

– попередня обробка (видалення шумів, яскравісна і колірна корекція, сегментація тощо);

– виявлення ознак (глобальних або локальних);

– розуміння (інтерпретація) та оцінка (наприклад, класифікація).

Розпізнавання образів (класифікація) відноситься до тематичної обробки зображень. Перед цим, зазвичай, виконують попередню обробку – відновлюють і покращують вихідне зображення.

Завдання розпізнавання зображень вирішуються на основі загальної теорії розпізнавання образів.

Розпізнавання образів – розділ кібернетики, який розробляє принципи і методи класифікації та ідентифікації предметів, явищ, процесів, сигналів, ситуацій.

У загальній теорії розпізнавання образів розрізняють два типи завдань:

– завдання таксономії (навчання без учителя);

– завдання розпізнавання (навчання з учителем).

У задачах таксономії потрібно розділити запропоновані об'єкти за кількома групами тільки на основі їх описів. Завдання другого типу виникає при потребі визначити клас, до якого належить опис деякого об'єкта.

Передбачається, що є набір з *N* об'єктів, для яких відомі образи (класи), до яких вони належать. Дану сукупність називають навчальною вибіркою, а складові її об'єкти – еталонами. Виходячи з навчальної вибірки потрібно, визначити клас, до якого належить опис деякого об'єкта.

Якщо перед початком класифікації невідомо, скільки та які об'єкти є на знімку, застосовують *класифікацію без навчання (некеровану класифікацію)*. Цей процес означає автоматичний розподіл пікселів зображення на підставі аналізу статистичного розподілу їх яскравості. Недоліком цієї класифікації є те, що потрібно виконувати дешифрування отриманих класів, щоб визначити, яким об'єктам зображення вони відповідають. Некеровану класифікацію часто використовують як попередній етап класифікації з навчанням.

Класифікацію з навчанням (керовану класифікацію) застосовують, коли наперед відома кількість класів об'єктів та їх типологічні особливості. У процесі цієї класифікації розподіл пікселів на класи здійснюють на основі порівняння значень характеристик кожного пікселя з еталонами (навчальними вибірками), які формують для кожного класу шляхом відбору пікселів з певним діапазоном характеристик відповідно до реальних об'єктів місцевості на знімку.

Формальний розв'язок задачі розпізнавання прийнято записувати у вигляді вирішальної функції $i = d(x)$, де i – номер класу, до якого належить опис об'єкта – вектор ознак x.

Множина всіх алгоритмів класифікації поділяється на дві узагальнені групи – керованої і некерованої класифікації та окремого методу – дерева рішень (рис. 15.1).

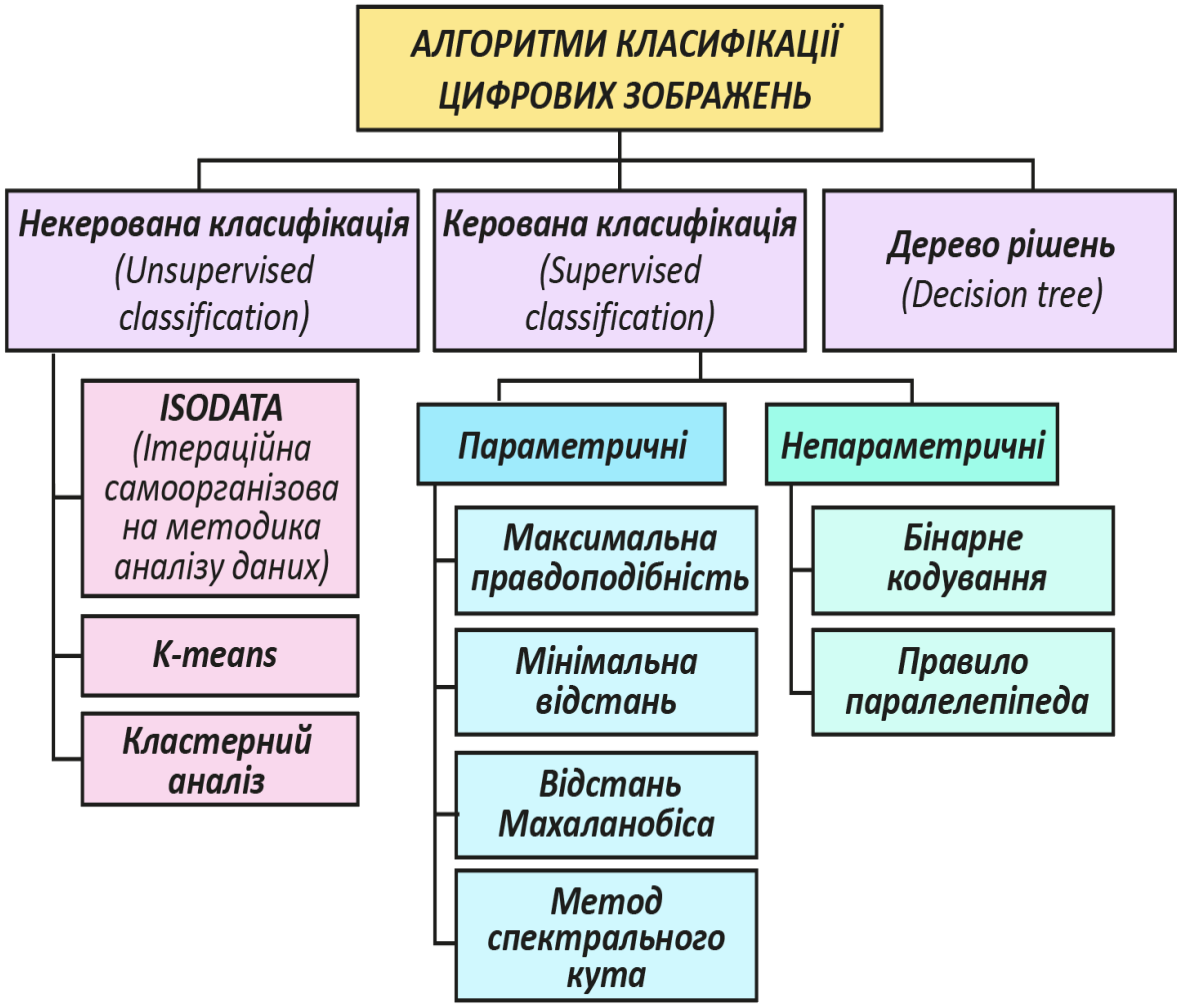


Рис. 15.1. *Алгоритми класифікації цифрових зображень*

У некерованій класифікації (Unsupervised classification) [44]. Використовуються алгоритми, що ґрунтуються на кластерному аналізі. Для формування кластерів можна застосовувати, наприклад, критерій мінімальної спектральної відстані до центрів кластерів.

Ітераційний процес кластеризації починається з довільно вибраних центрів для наперед заданої кількості кластерів (класів). Після визначення належності всіх пікселів до одного з класів центри кластерів переобчислюють, і процес класифікації повторюють відповідно до нових координат центрів кластерів та відстані пікселів до них у просторі ознак. Ітераційний процес завершується за дотримання однієї з таких умов:

– зміщення центрів кластерів на і-му кроці порівняно з *(i–1)*-м не перевищує певного наперед заданого малого значення;

– досягнуто наперед задане значення максимального відсотка пікселів, що не змінили свого класу;

– виконано наперед задану максимальну кількість ітерацій.

У програмних продуктах найчастіше реалізується некерована класифікація за методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) та K-means. Ці методи некерованої класифікації корисно застосовувати тоді, коли кількість навчальних вибірок мала або їх взагалі немає.

Керована класифікація (Supervised classification) [44]. ґрунтується на попередньому статистичному аналізі заданих еталонів (ідентифікованих ділянок зображення або бібліотек навчальних вибірок) зі створенням для кожного з них відповідних сигнатур (спектральних характеристик об’єктів або класів об’єктів на поверхні Землі, що є певною комбінацією відбитого і поглиненого електромагнітного випромінювання на різних довжинах хвиль та можуть однозначно ідентифікувати класи об’єктів) і в подальшому використовуються для визначення центрів класів.

Алгоритми класифікації, як і самі сигнатури, можуть бути *параметричними* й *непараметричними*.

15.2. Класифікації в тематичній обробці МДЗ

Основною метою використання МДЗ є витяг з них корисної інформації, яка використовується для складання топографічних і тематичних карт, інвентаризації земель, еколого-геологічної оцінки територій, досліджень динаміки природних і антропогенних об’єктів та явищ, створення оперативних і прогнозних карт тощо у будь-якій галузі, зокрема в геології. Цілком очевидно, що подальший прогрес у даній галузі безпосередньо пов’язаний з удосконаленням технологій тематичної обробки (інтерпретації, дешифрування) МДЗ.

Враховуючи, що сьогодні значну частину МДЗ отримують у цифровому вигляді, в даній галузі спостерігається перехід до цифрових методів обробки дистанційної інформації.

Ефективність використання МДЗ залежить не тільки від картографо-фотограмметричних особливостей вихідного знімка, але й від прийнятої методики

роботи з ними та використовуваних методів обробки. Саме на етапі вибору прийнятних методів і алгоритмів роботи найчастіше виникають істотні складнощі, оскільки методи в даній галузі є переважно проблемно-орієнтованими і загального підходу до покращення зображень не існує. Так, метод покращення, який є корисним для одного знімка, не обов'язково виявиться корисним для іншого. Підбір методів залежить у першу чергу від характеру даних, мети обробки, знання поданої на зображення території і підготовленості (досвіду в проведенні робіт з покращення зображень).

Отже, вивчення і систематизація методів витягу і здобуття корисної інформації з МДЗ є актуальною проблемою.

Ключова роль на етапі тематичної обробки приділяється класифікації.

Класифікація – це процес поділу сукупності даних на класи (групи) за певною ознакою.

У повсякденному житті людина доволі часто займається класифікацією (відділяє важкі предмети від легких, солодкі фрукти від кислих, гарячі страви від холодних тощо). Але якщо в повсякденному житті при класифікації об'єктів зазвичай використовуються фізичні параметри (маса, колір, температура тощо), то в комп'ютерній класифікації цим показником виступає величина яскравості пікселя, тобто кожен піксель знімка відноситься до одного з обраних класів.

При комп'ютерній класифікації кожний елемент розрізнення знімка (піксель) містить число, яке позначає яскравість цього елемента. Як правило, яскравості змінюються в діапазоні від 0 до 255 (що відповідає глибині кольору 8 біт). На звичайному чорно-білому знімку найбільші значення яскравості (близько 250–255) мають сніг, який щойно випав, хмари, а найменші (0–10) – вода, розораний чорнозем. Яскравість інших об'єктів має проміжні значення.

При багатозональній зйомці записуються значення яскравості об'єктів в окремих доволі вузьких ділянках – зонах – видимій і інфрачервоній частині спектра. Таким чином одночасно отримують декілька зональних знімків. Тоді при комп'ютерній обробці для кожного пікселя знімка використовується відразу декілька цифрових значень яскравості в різних спектральних зонах.

Класифікації – це комп'ютерне дешифрування знімків або процес автоматизованого поділу всіх пікселів знімка на групи (класи), які відповідають різним об'єктам.

Автоматичною класифікацією називають процес розбиття пікселів неперервного растрового зображення на категорії на основі їх спектральних значень, в результаті чого кожному пікселю присвоюється нове значення.

Процедура автоматичної класифікації найчастіше ґрунтується на статистичному аналізі різних характеристик зображення: просторових, спектральних або часових. При цьому виділяють два основні підходи до класифікації: піксельно-орієнтована і об'єкт-орієнтована класифікації (рис. 15.2).

Піксельно-орієнтована класифікація зображень ДЗЗ – це групування, при якому зображення систематизується відповідно до спектральної яскравості у кожному окремому пікселі.

Розрізняють *абсолютну* і *відносну* види класифікації. Абсолютна класифікація ідентифікує клас поверхні Землі попереднім визначенням і накопиченням спектральних характеристик усіх класів, які можуть бути використані в будь-якому специфічному додатку.

Її застосування потребує ефективного зменшення впливу атмосфери, високого спектрального розрізнення і великої кількості спектральних каналів, що можливе тільки при роботі з гіперспектральними зображеннями. Тому сьогодні найчастіше використовується відносна класифікація, заснована на широко використовуваних мультиспектральних знімках. Відповідно до того, чи введені додаткові дані до або після класифікації, розрізняють два види відносної класифікації:

– *з навчанням* (керована або контрольована класифікація, класифікація "з учителем");

– *без навчання* (некерована або неконтрольована класифікація – класифікація "без вчителя", кластеризація (від англ. *cluster* – група, скупчення)).

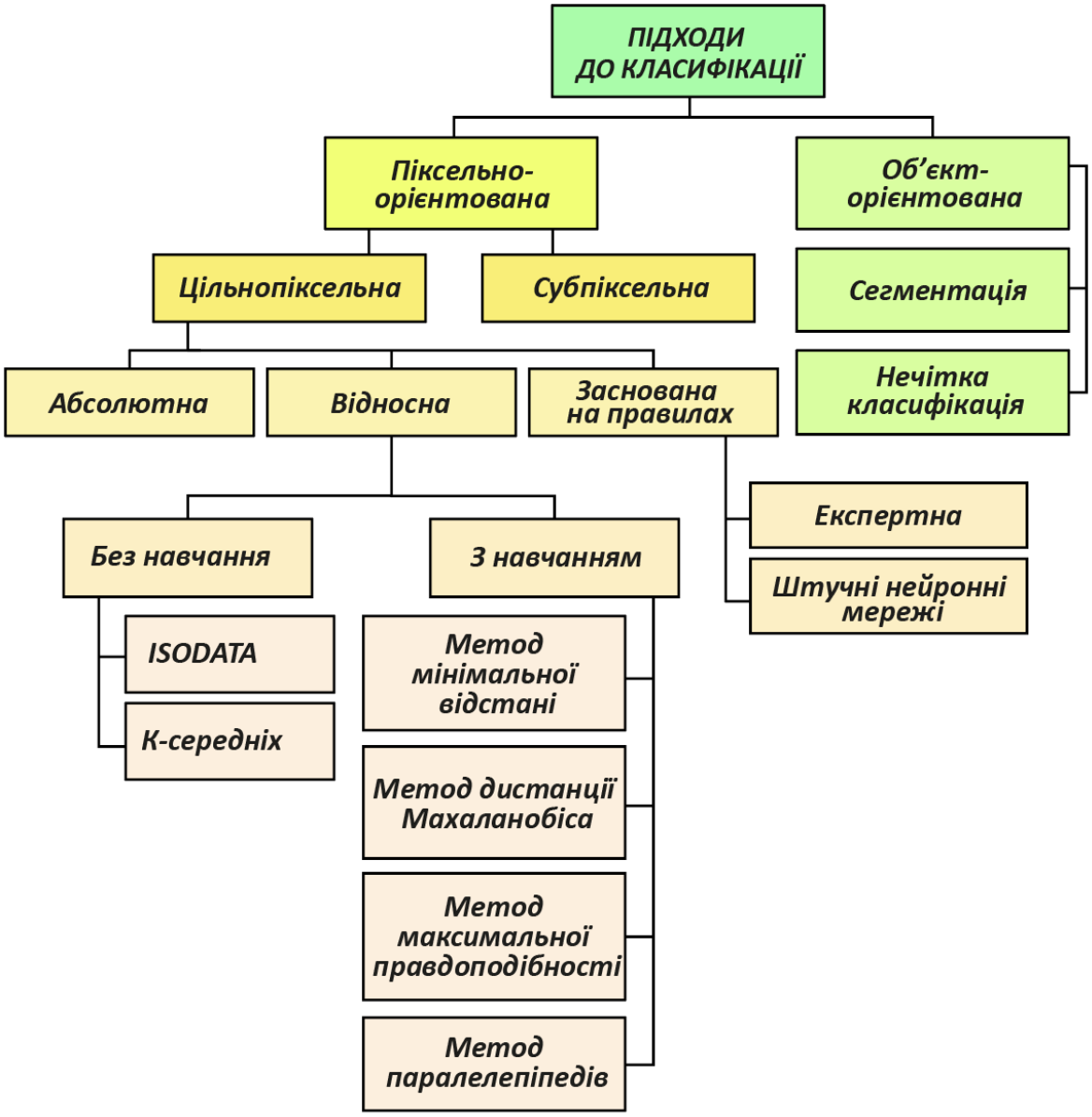


Рис. 15.2. *Види класифікацій*

При класифікації з навчанням відбувається аналіз пікселів у межах кожного еталонного полігона і створення спектральних сигнатур для кожного типу покриття. За порівнянням спектральних значень пікселів зі створеними сигнатурами виконується класифікація зображення.

Алгоритми некерованої класифікації (їх часто називають алгоритмами кластеризації) застосовують за відсутності апріорної інформації про об'єкт зйомки.

Кластерний аналіз дозволяє виділяти контури з неконтрастною за спектральною яскравістю структурою, наприклад рослинність, відкриті ґрунти, воду, хмари та інші об'єкти. З використанням алгоритмів кластеризації виконується автоматичне розділення зображення на групи пікселів, подібних за спектральними характеристиками (кластери).

Ці алгоритми потребують мінімум початкової інформації щодо числа класів кількості ітерацій.

15.3. Керована класифікація (класифікація з навчанням)

Класифікація з навчанням – це процес, при якому відбувається порівняння значення яскравості кожного пікселя з еталонами, в результаті чого кожен піксель відноситься до найбільш відповідного класу об'єктів.

Класифікацію з навчанням можна застосовувати, якщо:

– заздалегідь відомо, які об'єкти є на знімку;

– на знімку є невелика кількість (до 30) класів;

– ці класи чітко розрізняються на знімку.

При класифікації з навчанням спочатку задаються еталони для кожного класу – значення яскравості, типові для об'єктів (наприклад, хвойних і листяних лісів), які потрібно автоматично розрізнити на знімку. Іноді ці значення відомі заздалегідь, але найчастіше для їх обчислення дешифрувальник виділяє на знімку декілька ділянок, повністю зайнятих цими об'єктами (наприклад, всередині хвойного лісу, в межах листяного лісу). Безумовно, апріорі потрібно мати певні знання про місцевість, зображену на знімку, щоб знайти такі ділянки, тому й кажуть, що дешифрувальник "навчає" комп'ютер, тобто передає йому для класифікації свої знання.

Далі автоматично вимірюються значення яскравості пікселів у межах еталонних ділянок. Потім решту пікселів знімка комп'ютер порівнює з еталонними, і кожен з них відноситься до класу, найбільш близького за яскравістю. Утворюється вже готова карта класифікації (оскільки імена класів об'єктів задаються з самого початку).

Процес класифікації з навчанням передбачає декілька етапів (рис. 15.3):

– визначення завдань обробки знімка і вибір способу класифікації;

– вибір еталонних ділянок;

– проведення класифікації;

– оцінка якості результатів.

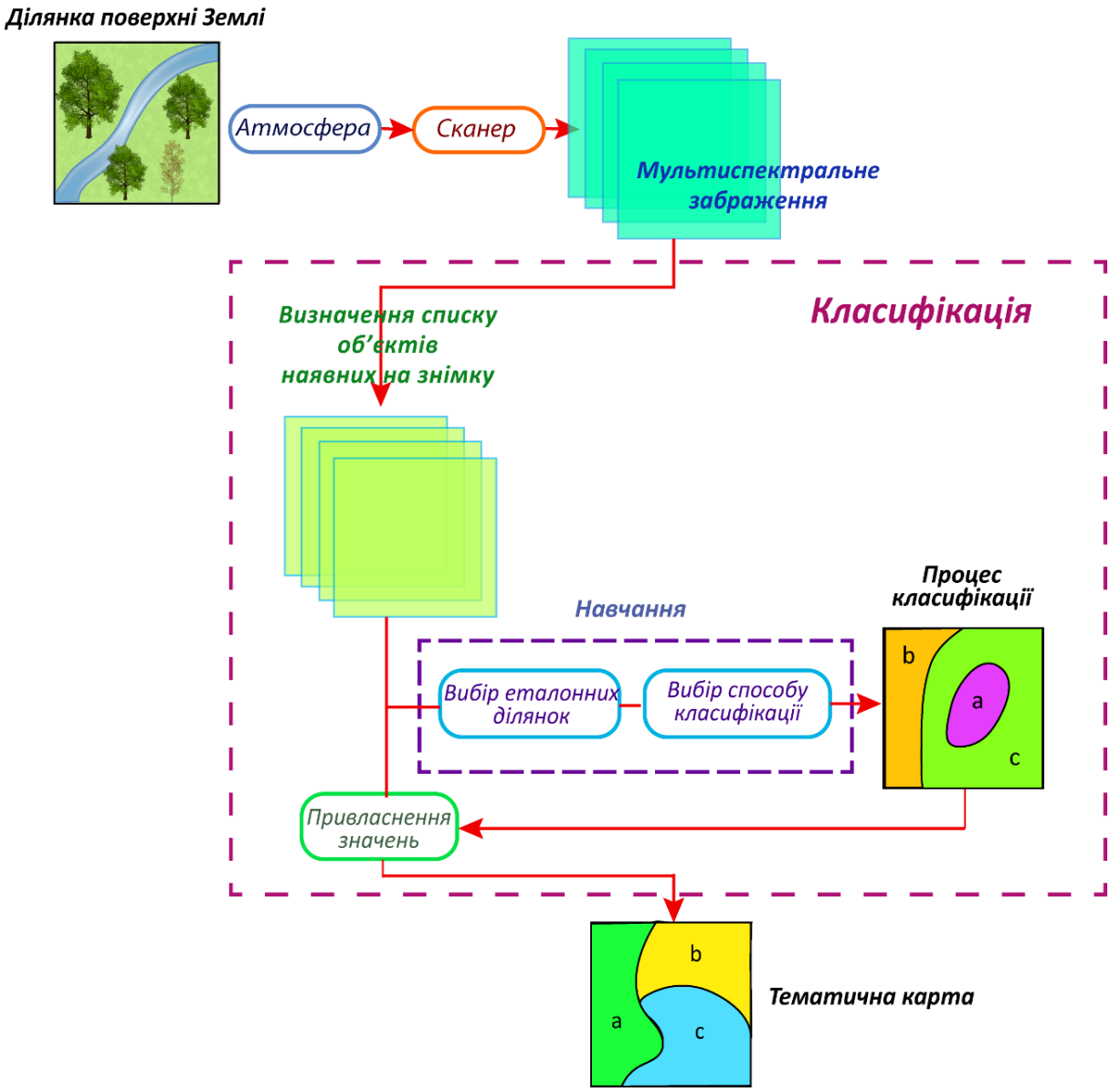


Рис. 15.3. *Етапи одержання та обробки мультиспектральних зображень [112]*

Визначення завдань обробки знімка і вибір способу класифікації. На цьому етапі обробки знімка потрібно:

1. Визначити список об'єктів дешифрування, оцінити характер розподілу значень яскравості цих об'єктів:

а) на знімку. На рис. 15.4 зображено спектральні криві трьох об'єктів, криві червоного і синього об'єкта мають схожу форму і значні відмінності у значеннях яскравості, в той час як синій і зелений об'єкти мають близькі значення яскравості і значні відмінності у формі;

б) в просторі спектральних ознак.

На рис. 15.5 зображено характер розподілу значень яскравості в просторі спектральних ознак. Зони значень яскравості червоного і зеленого об'єктів мають ізометричну форму і не перетинаються з іншими, зони помаранчевого і синього кольору перетинаються і мають складну форму.

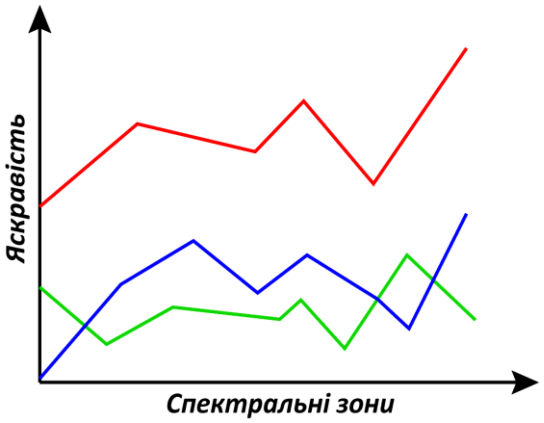


Рис. 15.4. *Спектральні криві трьох об'єктів*

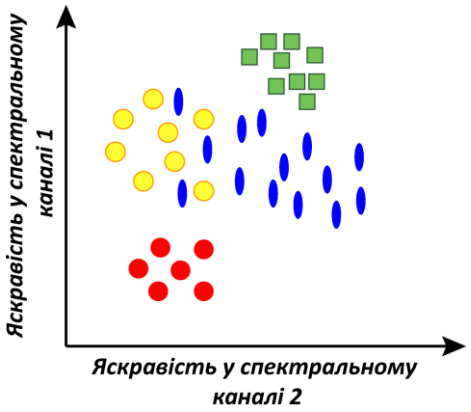


Рис. 15.5. *Розподіл значень яскравості в просторі спектральних ознак*

Важливо вибрати спосіб класифікації або правило, відповідно до якого буде здійснюватися розподіл пікселів зображення на класи. Стислу характеристику застосування основних способів класифікації наведено в табл. 15.1.

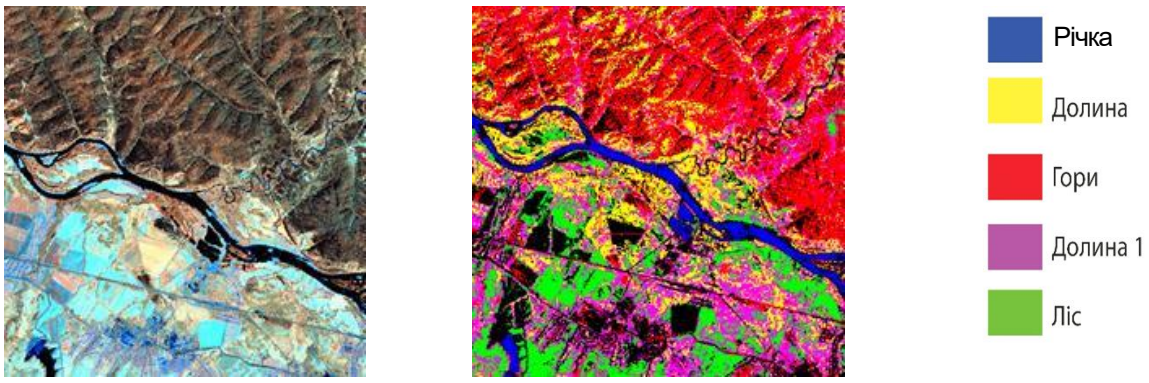
Таблиця 15.1

Основні методи класифікації

Метод спектрального кута	**Метод мінімальної відстані**	**Метод паралелепіпедів**
Спосіб спектрального кута дає гарні результати, коли потрібно провести класифікацію для об'єктів, які мають схожі значення яскравості	Спосіб мінімальної відстані використовують, коли зони значення яскравості об'єктів перетинаються	Спосіб паралелепіпедів застосовують, коли зони значення яскравості об'єктів не перетинаються
Метод максимальної правдоподібності	**Метод дистанції Махаланобіса**	**Метод бінарного кодування**
Спосіб застосовують в особливо складних випадках, коли зони значень яскравості різних класів у просторі ознак перекриваються і мають складну (або витягнуту) форму	Спосіб є більш точним, порівняно зі способом мінімальної відстані, оскільки враховує розподіл значень яскравості вибірок, що слугують для навчання	Спосіб застосовують, якщо всі пікселі на знімку потрібно розділити на два класи

Метод спектрального кута дає гарні результати, коли потрібно провести класифікацію для об'єктів, які мають схожі значення яскравості у всіх спектральних діапазонах. Крім того, оскільки цей спосіб не враховує значення яскравості пікселів, то на результати не впливають і ефекти засвічування знімків.

Приклад класифікації об'єктів за допомогою методу спектрального кута подано на рис. 15.6 [92].



а) *б)*

Рис. 15.6. *Приклад класифікації об'єктів за допомогою методу спектрального кута: а) первісний знімок, зроблений за допомогою КА Landsat; б) результат класифікації методом спектрального кута*

При класифікації методом спектрального кута:

1) попередньо створюють еталонні ділянки;

2) всі пікселі знімка, зокрема й еталонні, розглядаються як вектори в просторі спектральних ознак (рис. 15.7);

3) задається максимально допустимий спектральний кут, тобто якщо кут між еталонним вектором і вектором пікселя, який зазнає класифікації, менший від максимального, то цей піксель відноситься до даного класу, якщо більший – не відноситься [92].

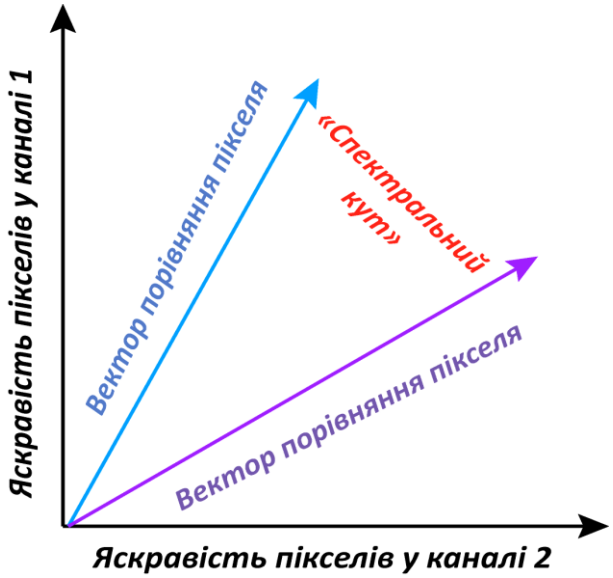


Рис. 15.7. *Ілюстрація методу класифікації об'єктів за допомогою способу спектрального кута*

Примітка. Класи, отримані методом спектрального кута, залежать від кута між векторами яскравості пікселів і не залежать від довжини вектора (значення яскравості).

Метод мінімальної відстані використовують, коли спектральні ознаки різних класів схожі і діапазони значень їх яскравості перекриваються. Піксель

відноситься до того еталонному класу, евклідова відстань до центра якого в просторі ознак мінімальна. При цьому відсутні некласифіковані пікселі.

Рішення про те, до якого класу належить піксель, приймається на підставі порівняння відстаней між пікселями і середніми значеннями в просторі яскравості без урахування вектора дисперсії яскравості еталонного об'єкта:

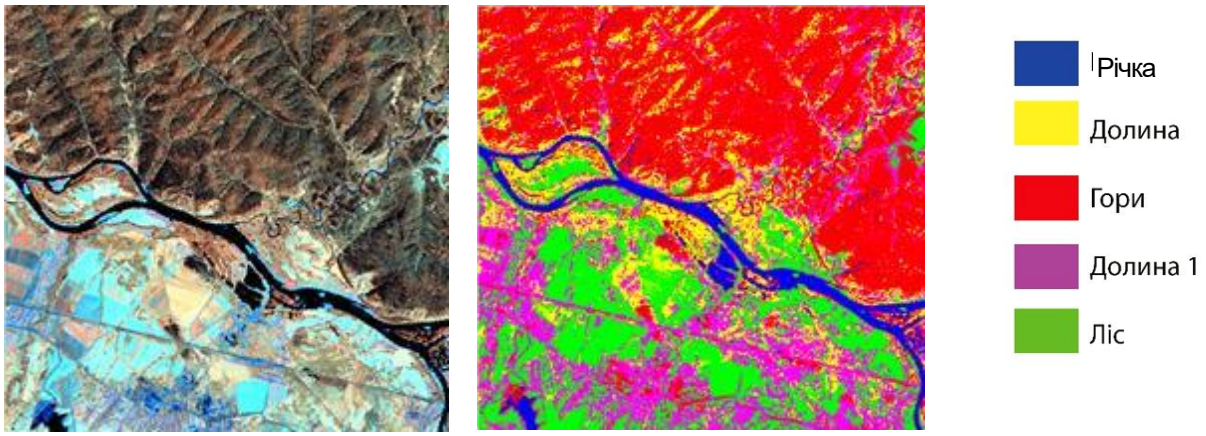
$$r_k^2 = \sum_{m=1}^{n} \left(f_{mif} - m_k\right)^2.$$

Це найбільш простий і швидкий метод класифікації, він вимагає мінімальних відомостей про класи, але нерідко поступається методу максимальної правдоподібності *d* точності класифікації. Порівняння з результатами класифікації за методом максимальної правдоподібності свідчить, що у даному випадку найкраще виділилися згарища та інші елементи ландшафту, позбавлені рослинності, гірше виділилися листяні дерева.

Метод мінімальних відстаней не враховує оточення пікселя, тому іноді може поступатися методам кластерного аналізу, методам сегментації по нарощуванню зон та по виділенню кордонів.

Метод мінімальних відстаней заснований на евклідовій метриці та не пов'язаний із нормальним законом розподілу.

Приклад класифікації об'єктів за допомогою методу мінімальної відстані наведено на рис. 15.8 [92].



а) *б)*

Рис. 15.8. *Приклад класифікації об'єктів за допомогою методу мінімальної відстані: а) первісний знімок, зроблений за допомогою КА Landsat; б) результат класифікації способом мінімальної відстані*

Далі відбувається розподіл пікселів на класи: якщо відстань від даного вектора до еталонного менша від заданого значення (яке задають попередньо), то цей вектор відносять до даного класу; якщо відстань більша від заданого значення, відносять в інший клас або взагалі не відносять у жодний з класів (рис. 15.9, 15.10).

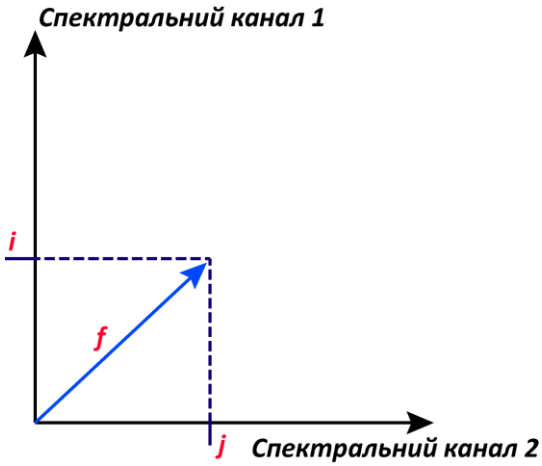


Рис. 15.9. *Ілюстрація методу класифікації об'єктів за допомогою способу мінімальної відстані*

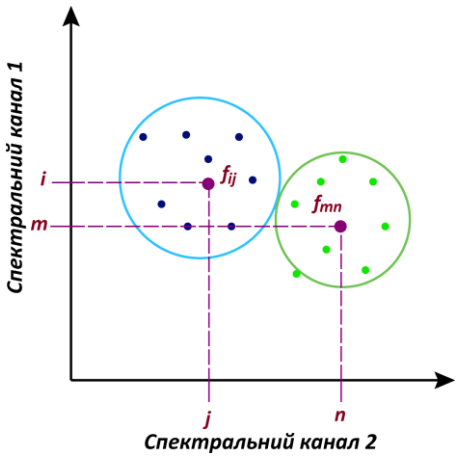


Рис. 15.10. *Графічна ілюстрація класифікації методом мінімальної відстані*

Примітка. Недолік даного методу полягає в тому, що при його застосуванні не враховується розподіл (дисперсія) значення яскравості пікселів в еталонних ділянках.

У двовимірному просторі спектральних ознак одержані класи виглядають як округлі зони, в багатовимірному просторі – як кулеподібні зони.

Метод паралелепіпедів (прямокутників) застосовують, коли зони значення яскравості об'єктів не перетинаються. Тут використовуються відомості про класи у вигляді векторів середніх значень яскравості μ_k і векторів дисперсій σ_{mk}^2, що отримані у процесі навчання. Відомо, що для нормально розподіленої випадкової величини 95,4% її значень лежать у межах відхилень від середнього значення, менших 2σ.

Розглянемо випадок двох спектральних компонент.

На рис. 15.11 по вертикальній осі відкладені значення яскравості f_1 у першому каналі, по горизонтальній осі – значення яскравості f_2 у другому каналі.

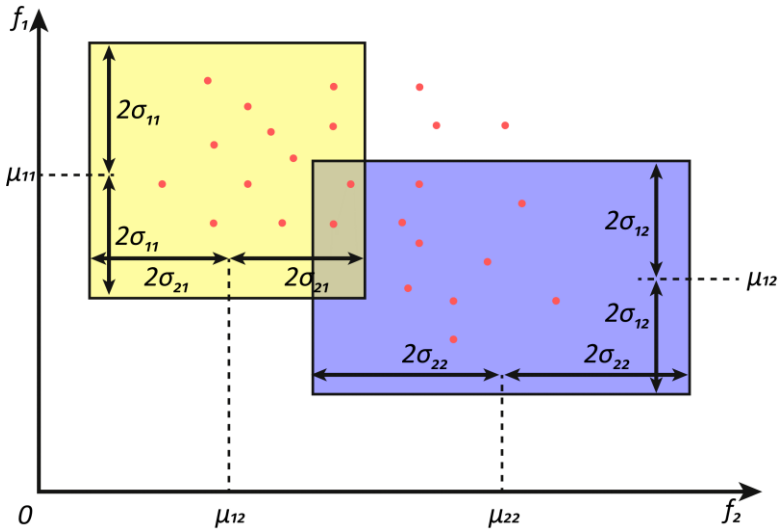


Рис. 15.11. *Дві спектральні компоненти*

Зазначені середні значення яскравості μ_{11} і μ_{12} для першого і другого класів у першому каналі, μ_{21} і μ_{21} для першого і другого класів у другому каналі. Від значення середньої яскравості в обидві сторони відкладені значення середньо-квадратичного відхилення σ_{11}, σ_{12}, σ_{21}, σ_{22} для першого і другого класу в кожному із двох каналів.

У двовимірному випадку отримано прямокутники, у три- і більше мірному випадку маємо паралелепіпеди у відповідному просторі.

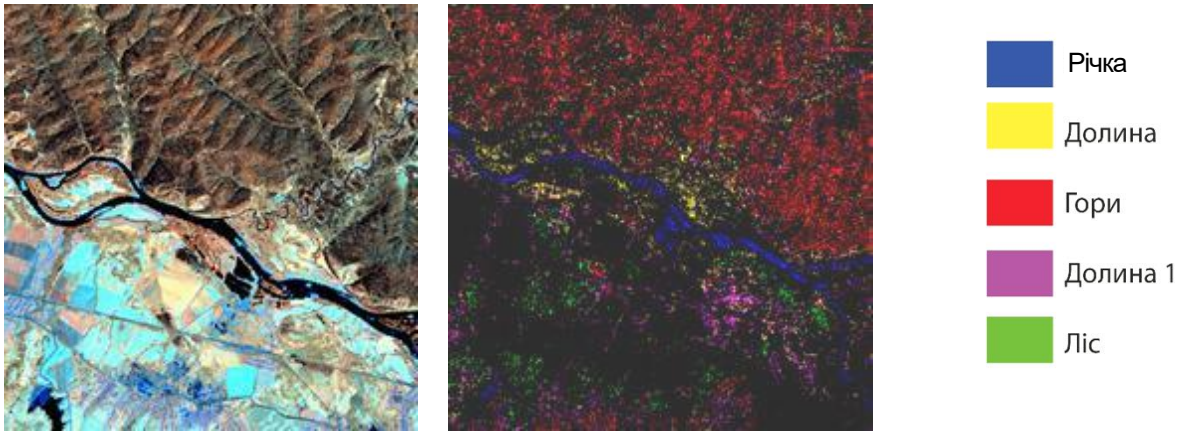
Якщо компоненти вектора яскравості f_{1ij} та f_{2ij} такі, що потрапляють в лівий прямокутник, приймається рішення про належність пікселя до першого класу, якщо вони потрапляють у правий прямокутник, то до другого.

Прямокутники можуть частково перекриватися, особливо це характерно для зон, що прилягають до кутів. У цьому разі точки виявляються нерозпізнаними.

Метод паралелепіпедів відноситься до числа швидких методів класифікації, однак, за якістю розпізнавання він поступається більшості з розглянутих методів, як видно із зображення.

Метод паралелепіпедів найдоцільніше використовувати для попередньої класифікації, він найбільш ефективний при нормальному законі, оскільки для нього виконується "правило двох сигм".

Приклад класифікації об’єктів за допомогою способу паралелепіпедів подано на рис. 15.12 [92].



а) *б)*

Рис. 15.12. *Приклад класифікації об’єктів за допомогою методу паралелепіпедів: а) первісний знімок, зроблений за допомогою КА Landsat; б) результат класифікації методом паралелепіпедів*

Оскільки зона розподілу значень спектральних ознак кожного з класів має чіткі рамки, на знімку можуть виявитись пікселі, що не потрапляють у жодну одну із зон, так звані некласифіковані пікселі.

У процесі класифікації методом паралелепіпедів:

– попередньо створюють еталонні ділянки;

– значення яскравості пікселів розглядається як вектор f_{ij} у просторі спектральних ознак i та j – це значення яскравості пікселя в різних спектральних каналах (рис. 15.13);

– розраховується спектральна відстань між еталонними векторами і векторами значень яскравості всіх пікселів знімка;

– відстань між двома векторами (r) розраховується за формулою:

$$r = \sqrt{\sum_k (f_{k_{ij}} - f_{k_{mn}})^2},$$

де k – номер спектрального каналу.

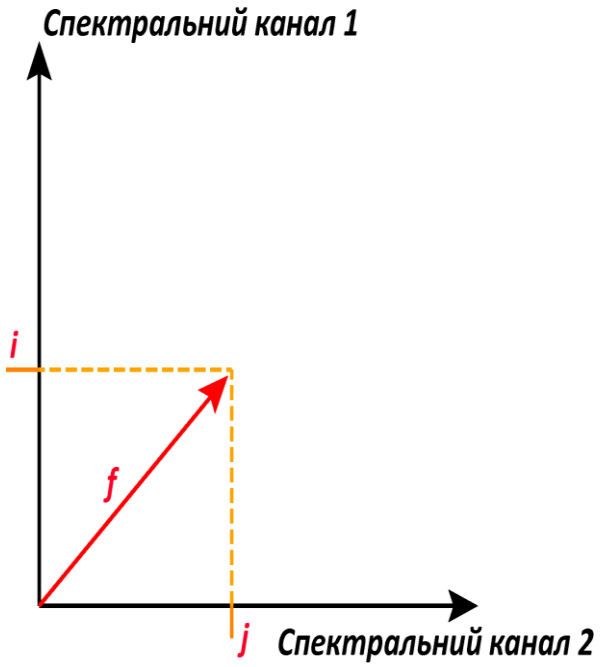


Рис. 15.13. *Ілюстрація способу класифікації об'єктів за допомогою способу паралелепіпедів*

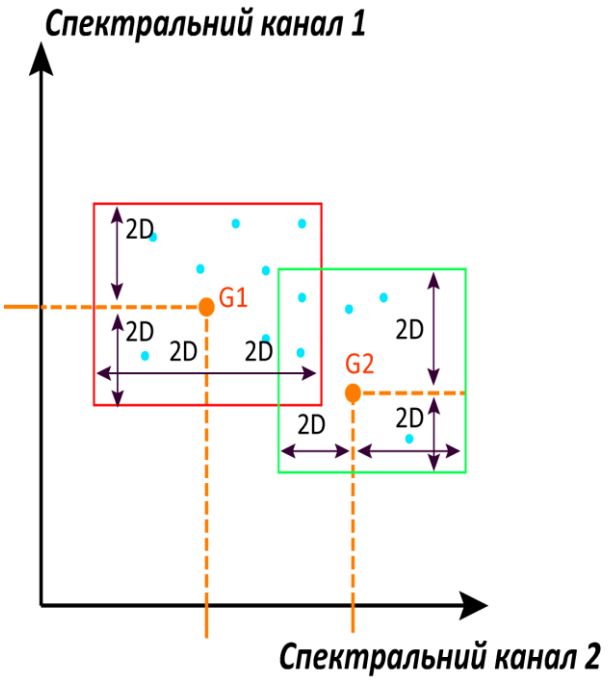
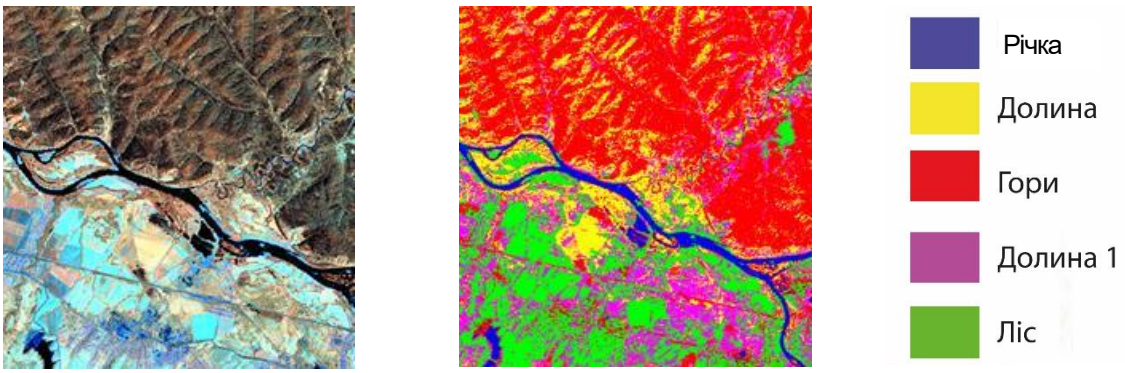


Рис. 15.14. *Графічна ілюстрація класифікації способом паралелепіпедів*

Ця відстань (як видно із формули) розраховується сукупно по всіх спектральних каналах, тобто все, як у способі мінімальної відстані, але спосіб паралелепіпедів використовує дисперсію (D), що робить цей метод більш точним, оскільки відомо, що для вибірки, значення якої розподілені відповідно до нормального закону, 95,5 % її значень лежать в межах відхилень від середнього значення менше, ніж 2D, тому при класифікації методом паралелепіпедів у даний клас включаються пікселі, значення яскравості, які знаходяться від середнього навчальної вибірки менше, ніж на 2D.

Якщо намалювати отримані зони класів на площині (двовимірний простір ознак), то отримана фігура буде прямокутником, у тривимірному просторі – паралелепіпедом.

Приклад класифікації об'єктів за допомогою методу паралелепіпедів подано на рис. 15.15.



а) *б)*

Рис. 15.15. *Приклад класифікації об'єктів за допомогою способу максимальної правдоподібності: а) первісний знімок, зроблений за допомогою КА Landsat; б) результат класифікації способом максимальної правдоподібності*

Примітка. Прямокутники можуть частково перекриватись, що призводить до невизначеності.

Метод максимальної правдоподібності забезпечує оптимальне розпізнавання. Він розраховує ймовірність, із якою даний піксель належить певному класу. Кількість і параметри класів задаються користувачем шляхом указівки навчальних вибірок. Кожен піксель відноситься до того класу, до якого він може належати з найбільшою імовірністю. При розрахунку імовірності враховується яскравість пікселя та яскравості пікселів, що його оточують.

У двовимірному просторі спектральної яскравості, отримані даним способом класи описуються еліпсами, а в багатовимірному – еліпсоїдами (рис. 15.16).

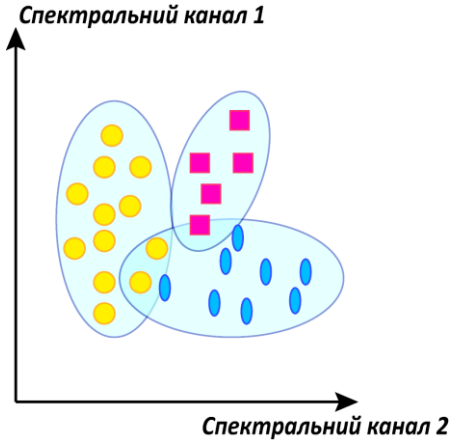


Рис. 15.16. *Графічна ілюстрація класифікації способом максимальної правдоподібності*

Даний спосіб має високу точність, враховує дисперсію значень ознак класів (як у вирішальному правилі відстані Махаланобіса) і не залишає некласифіковані пікселі (як у методі мінімальної відстані).

Метод вимагає доволі великої кількості операцій і є порівняно повільним. Бажано, щоб під час його використання враховувалися не тільки яскравості в спектральних каналах для кожного одиночного пікселя, але і його оточення. У

деяких випадках розглянутий варіант методу максимальної правдоподібності за якістю програє більш простим методам, які беруть до уваги взаємні зв'язки сусідніх пікселів.

Квадратичну форму $\left[(f_{ij}-\mu_k)^T R_k^{-1}(f_{ij}-\mu_k)\right]$ можна спростити, якщо покласти $R_{mnk}=0$, $m \neq n$, тобто не враховувати кореляцію яскравостей пікселя у спектральних каналах. Тоді залишаться тільки два члени, множник перед квадратними дужками стане рівним 1.

У разі двох класів k та s отримуємо такі вирази [69]:

$$r_k^2 = \sum_{m=1}^{n} \frac{(f_{mij}-\mu_{mk})^2}{\sigma_{mk}^2},\ r_s^2 = \sum_{m=1}^{n} \frac{(f_{mij}-\mu_{ms})^2}{\sigma_{ms}^2},$$

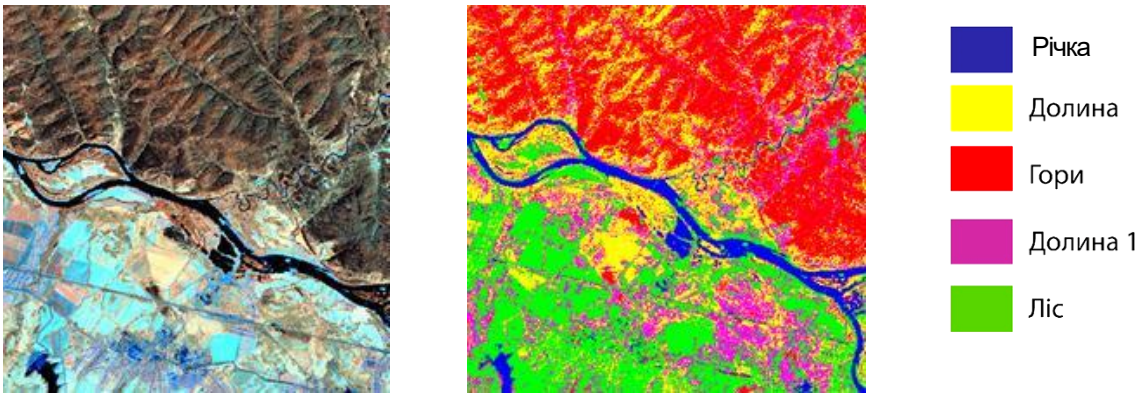
де m – номер спектрального каналу;
n – загальне число каналів;
r_k^2 – квадрат відстані в просторі яскравості по евклідовій метриці між класифікованих пікселем з вектором f_{ij} і вектором середнього значення μ_k еталонного об'єкта "k".

Під час використання наведеної вище формули вважається, що піксель відноситься до того класу, де менший один із двох r_k^2 чи r_s^2. Точність r_k^2 істотним чином залежить від точності оцінювання σ_k^2, як і в методі максимальної правдоподібності.

Спосіб дистанції Махаланобіса. Цей спосіб класифікації схожий на спосіб мінімальної відстані, але відрізняється тим, що в процесі класифікації вимірюється не евклідова (як у способі мінімальної відстані), а відстань Махаланобіса.

Це означає, що цей спосіб ураховує розподіл (дисперсію) значень яскравості пікселів в еталонних ділянках. Тому якщо евклідова відстань від вектора яскравості даного пікселя до двох еталонних векторів однакова, то цей піксель буде віднесений до того класу, дисперсія еталонної вибірки якого більша.

Приклад класифікації об'єктів за допомогою способу дистанції Махаланобіса подано на рис. 15.17.



а) *б)*

Рис. 15.17. *Приклад класифікації об'єктів за допомогою способу дистанції Махаланобіса: а) первісний знімок, зроблений за допомогою КА Landsat; б) результат класифікації способом дистанції Махаланобіса*

Вибір еталонних ділянок передбачає цифрування фрагментів знімка, однорідних за яскравістю і розташуванням (рис. 15.18).

Згідно з емпіричним правилом кожна еталонна ділянка повинна містити в 10–100 разів більше пікселів, ніж кількість спектральних каналів знімка.

Способи оцінки якості еталонних ділянок:

а) побудувати й оцінити криву розподілу значень яскравості пікселів на обраній ділянці: характер розподілу повинен підкорятися нормальному (гаусовому) закону розподілу.

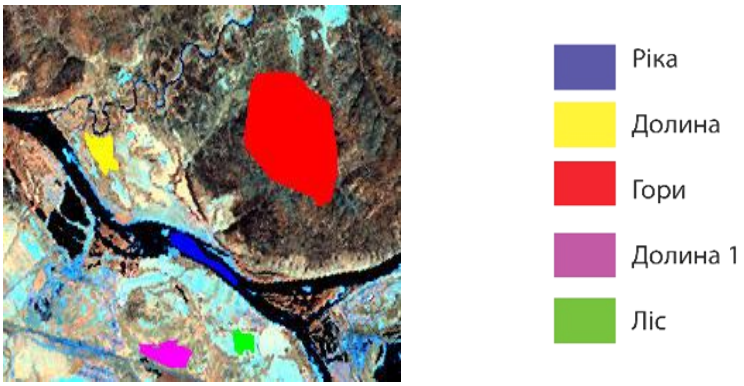


Рис. 15.18. *Оцифровування еталонних ділянок*

Для оцінки однорідності навчальної вибірки потрібно оцінити величину дисперсії: якщо дисперсія має високе значення, то вибірка неоднорідна і класифікація відбудеться з великою кількістю помилок (рис. 15.19);

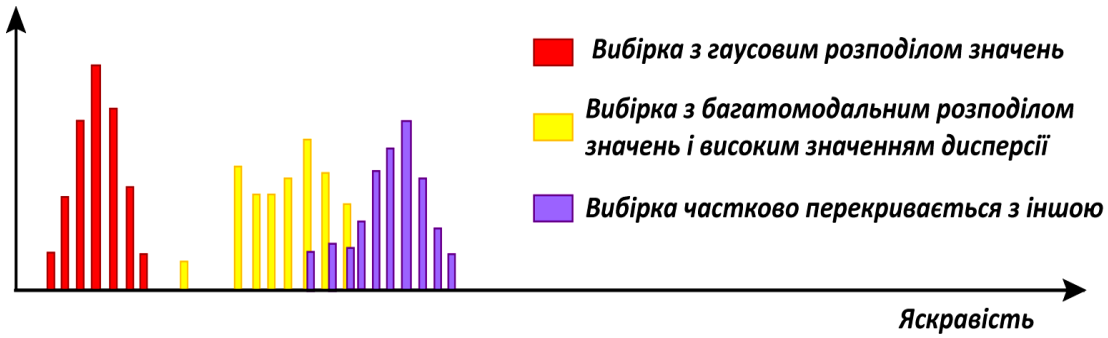


Рис. 15.19. *Оцінка однорідності вибірки*

б) поєднати криві розподілу значень яскравості пікселів усіх навчальних вибірок, щоб оцінити їх розрізненність. Якщо вибірки значно перекриваються, то класифікація відбудеться з великою кількість помилок.

Після виконання процесу класифікації потрібно оцінити достовірність отриманих результатів. Оцінка достовірності здійснюється:

а) візуально, щоб виявити грубі помилки,

в) кількісно, тобто контрольні ділянки зображення, що класифікується, порівнюють із наземними даними (картами, знімками крупного масштабу, літературними джерелами).

Якщо кількість помилок перевищує встановлені для конкретного завдання межі, то створюють нові навчальні вибірки і процес класифікації повторюють.

На відміну від піксельно-орієнтованої при використанні об’єктно-орієнтованої класифікації не прагнуть класифікувати окремий піксель, а зосереджуються на об’єктах зображення. Об’єкти оцінюються за їх спектральними особливостями, формою і структурою [83].

Субпіксельна класифікація полягає в оцінці складу змішаного пікселя з точки зору пропорцій класів земного покриву. Для знімків із низьким розрізненням цей метод не працює, оскільки гомогенний земний покрив (наприклад, як у води) є доволі нетиповим. Оцінка точності результатів нечіткої і субпіксельної класифікації вимагає наявності нечітких або довідкових даних підпікселя, які дуже важко отримати.

Останніми десятиліттями методи обробки даних ДЗЗ доволі інтенсивно розвиваються: з’являються нові класифікатори, засновані на досягненнях у галузі моделювання штучного інтелекту й інших сферах прикладної математики (наприклад, нейронні мережі). На передній план висуваються також дослідження, спрямовані на автоматизацію діяльності висококваліфікованих фахівців з дешифрування знімків шляхом створення експертних систем, що імітують роботу експертів.

15.4. Некерована (непараметрична) класифікація

Якщо форма функцій розподілу ймовірностей невідомо заздалегідь, то використовуються *непараметричні методи класифікації*.

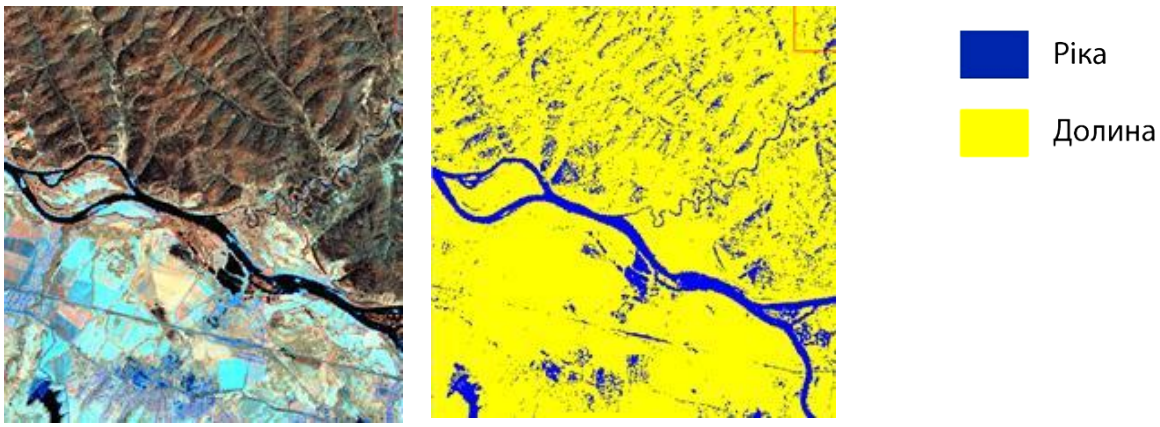
Непараметричні методи мають великі потенційні можливості для точної оцінки функцій розподілу ймовірностей і для точного розпізнавання, але ця перевага, зазвичай, вимагає складних систем, що розпізнають, великої кількості навчальних образів і, головне, великих часових витрат. Непараметричні алгоритми, зазвичай, синтезують евристично, часто використовуються локальні оцінки ймовірності за емпіричною частотою.

У непараметричних алгоритмах також можуть застосовуватись певні наперед визначені правила класифікації, зокрема:

– *бінарне кодування* використовують, коли на знімку всі пікселі потрібно розділити на два класи. За бінарного кодування пікселям надають одне з двох значень відповідно до двох визначених класів, наприклад, вода і суша, на основі порівняння зі значеннями еталонних вибірок. У процесі класифікації значення характеристики кожного пікселя порівнюють із середнім значенням характеристики еталонної вибірки В результаті утворюється бінарне зображення. Приклад класифікації об’єктів за допомогою бінарного кодування подано на рис. 15.20;

– *правило паралелепіпеда* застосовують, коли зони значення яскравості об’єктів не перекриваються. У просторі спектральних ознак виділяються ділянки у формі паралелепіпедів, які обмежують множину значень яскравості об’єктів певного класу. Якщо піксель за своїм значенням вектора яскравості f_{ij} у просторі ознак потрапляє в одну із виділених зон, він належить до відповідного класу.

При класифікації без навчання всі пікселі знімка поділяються на кілька груп або кластерів тільки на підставі подібності і відмінності їх значень яскравості [116].



а) *б)*

Рис. 15.20. *Приклад класифікації об'єктів за допомогою бінарного кодування: а) первісний знімок, зроблений за допомогою КА Landsat; б) результат класифікації способом бінарного кодування*

Класифікація без навчання – це процес, при якому розподіл пікселів зображення відбувається автоматично, на основі аналізу статистичного розподілу яскравості пікселів.

Потрібно зазначити, що перед початком класифікації невідомо, скільки і яких об'єктів є на знімку, а після проведення класифікації необхідне дешифрування отриманих класів, щоб визначити, яким об'єктам вони відповідають. Критерієм віднесення пікселів до того чи іншого кластера слугує схожість спектральних характеристик.

Фахівець, що задає комп'ютеру таку класифікацію, вказує тільки найнеобхідніші умови, наприклад, скільки класів він хоче отримати або наскільки повинні бути схожі яскравості пікселів у межах одного класу. Решта роботи виконується комп'ютером. Результатом є попередня карта кластеризації, на якій різними кольорами виділені кластер 1, кластер 2 тощо. Після цього фахівець-дешифрувальник порівнює карту кластеризації з наявними картами місцевості, наземними знімками й іншими даними і визначає, чому, яким об'єктам відповідає кожний кластер. Так отримують остаточну карту класифікації, де в легенді перераховані вже не кластери, а класи об'єктів на місцевості.

Отже, класифікацію без навчання застосовують у випадку, якщо:

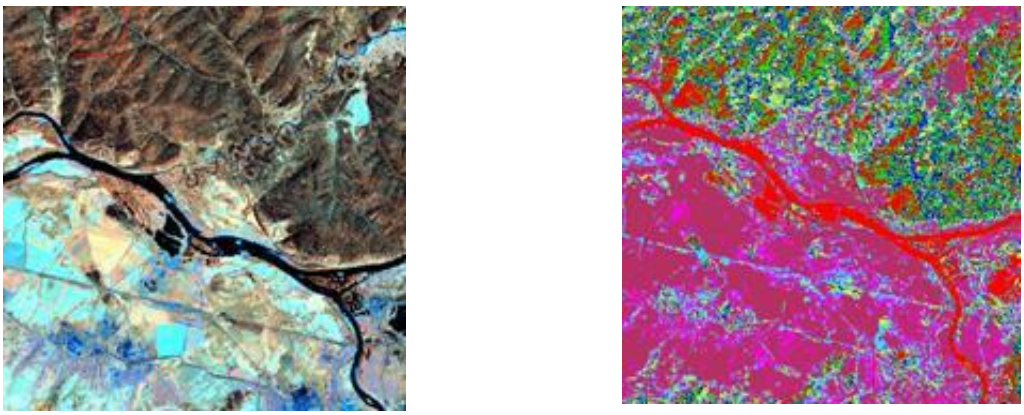
а) заздалегідь невідомо, які об'єкти є на знімку;

б) на знімку велика кількість об'єктів (більше 30) зі складними межами;

в) це попередній етап перед класифікацією з навчанням.

Найбільш поширеними методами класифікації без навчання є ISODATA і K-Середніх.

ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) – ітераційна методика аналізу даних, самоорганізуюча, яка заснована на кластерному аналізі. Основний параметр, що задається перед проведенням обчислень, – кількість кластерів, які потрібно отримати. Приклад класифікації об'єктів за допомогою способу ISODATA подано на рис. 15.21.



а) *б)*

Рис. 15.21. *Приклад класифікації об'єктів за допомогою способу ISODATA: а) первісний знімок, зроблений за допомогою КА Landsat; б) результат класифікації способом ISODATA*

Етапи класифікації ISODATA:

1) розрахунок статистичних параметрів розподілу яскравостей усього знімка в кожній спектральній зоні (мінімальне, максимальне, середнє значення, стандартне відхилення);

2) всі пікселі знімка поділяються на *n* рівних діапазонів у просторі спектральних ознак, для кожного з них визначається середнє значення і середнє відхилення;

3) перша ітерація кластеризації, тобто в просторі спектральних ознак для кожного пікселя розраховується спектральна відстань до середніх значень і кожний піксель відносять до певного кластера. В один кластер потраплять ті пікселі, між якими менша відстань у просторі спектральних ознак;

4) розрахунок реальних середніх значень для отриманих класів;

5) наступна ітерація з новими значеннями середніх й уточнення меж класів, при цьому кількість класів може змінюватись.

Процес триває доти, поки не буде досягнута максимальна (заздалегідь встановлена) кількість ітерацій або досягнутий максимальний відсоток пікселів, що не змінили свій клас під час останньої ітерації (цей параметр також задається заздалегідь), рис. 15.22.

Зазвичай цей параметр, так званий поріг збіжності, дорівнює 95–99 % усіх пікселів. Оскільки при певному розподілі значень яскравості на знімку такої стабілізації не відбувається, тому одночасно використовують другий обмежувальний параметр – максимальну кількість ітерацій.

Спосіб ISODATA потребує значних обчислювальних ресурсів. Швидкість обробки залежить від заданої кількості класів, об'єму знімка, процесора, розміру оперативної пам'яті, програмного забезпечення. Проте за результатами обробки знімка за цим способом виявляється розподіл об'єктів з різними спектральними образами. Крім того, спосіб ISODATA є параметричним, оскільки значення яскравості групуються навколо середнього значення яскравості кластера.

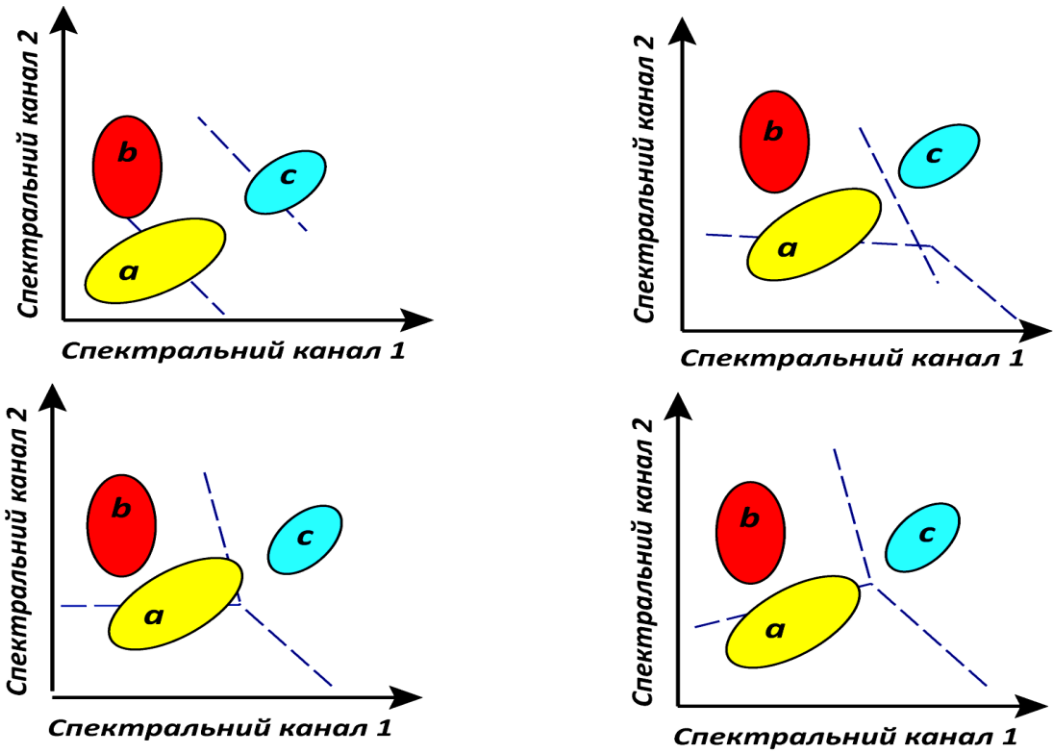


Рис. 15.22. *Графічна інтерпретація класифікації способу ISODATA*

Метод класифікації без навчання K-середніх відрізняється від методу ISODATA тим, що потребує початкового задання певної кількості середніх значень для формування вихідних класів, отже, цей метод використовують, коли об’єкти на знімку добре розрізняються.

Таким чином, на даний час у сфері обробки МДЗ накопичено немалий досвід розпізнавання і дешифрування зображень, однак універсальних методів для повністю автоматичного дешифрування знімків поки що немає. Вибір методу класифікації багато в чому визначається наявністю апріорної інформації, якістю використовуваного знімка, розв’язуваним завданням, а також досвідом і інтуїцією дешифрувальника.

Окремим класом класифікації цифрових зображень можна вважати "дерево рішень", яке відповідне схемі алгоритму *покрокової багаторівневої класифікації* [7; 116]. Його перевагою є багаторівневе налаштування, постійний контроль результатів та можливість використання збереженого "дерева рішень" для інших зображень.

15.4.1. Робастні алгоритми

Серед непараметричних алгоритмів слід виділити робастні (стійкі) алгоритми, справедливі з тією чи іншою ефективністю при різних законах розподілу. Прикладом непараметричного алгоритму є метод мінімальних відстаней, метод використовує середні значення яскравості і дисперсії або тільки середні значення яскравості об’єктів, знайдені з навчальної вибірки.

При цьому припущення про функції розподілу не використовуються. Головне, щоб середні значення яскравості і дисперсії існували.

Прикладом непараметричного алгоритму, що використовується під час придушення шуму у вигляді крапок і ліній на зображенні, є алгоритм *медіанної фільтрації*.

15.4.2. Рангова статистика

Розглянемо типовий робастний алгоритм (ранговий), який враховує відхилення елементів даної вибірки від елементів випадкової вибірки. Наприклад, є зображення лісу з розрізненням 30 м, на якому видно крони дерев та просіку. Потрібно виявити і виділити зображення просіки (рис. 15.23) [124].

Можна використати градієнтний фільтр, наприклад, фільтр Лапласа. Просіка стає більш помітною, але пікселі, що відносяться до неї, оточені іншими пікселями, які можна інтерпретувати як шум (рис. 15.24) [124].

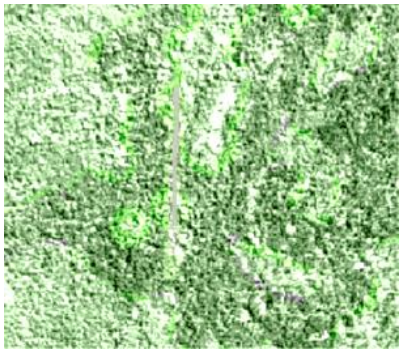


Рис. 15.23. *Зображення лісу з просікою*

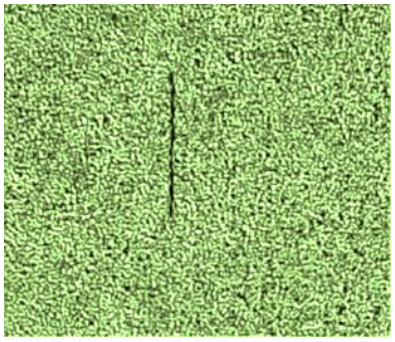


Рис. 15.24. *Результат застосування фільтру Лапласа*

Розглянемо один рядок зображення, який показано на рис. 15.23.

Рис. 15.23. *Рядок зображення, що містить пікселі об'єкта та шуму*

Нехай, що A – пікселі об'єкта (просіки), x_i – вибіркові значення яскравості пікселів (табл. 15.2).

Таблиця 15.2.

Вибіркові значення яскравості пікселів

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
4	3	13	8	5	18	9	6	11	15

Рангом R_i елемента вибірки x_i називається число елементів n цієї вибірки, менших або рівних x_i. Якщо елементи вибірки розташувати у порядку зростання від меншого до більшого (сформувати варіаційний ряд за зростанням), то отримаємо таблицю 15.3.

Таблиця 15.3.

Вибіркові значення яскравості пікселів

R_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	3	4	5	6	8	9	11	13	15	18
x_i	x_2	x_1	x_5	x_8	x_4	x_7	x_9	x_3	x_{10}	x_6

Ранг R_9 елемента x_9 дорівнює 7, ранг R_2 елемента x_2 дорівнює 1, ранг R_6 елемента $x6$ дорівнює 10.

Коли спостерігається тільки шум, враховуючи незалежність та однорідність значення яскравості пікселів, то величини рангів рівноймовірні при будь-яких функціях розподілу.

Якщо ж у вибірці є суміш шуму і деякого невипадкового зображення, то величини рангу не будуть рівноймовірними.

15.4.3. Двовибірний алгоритм Вілкінсона

Для виявлення локальних контурних ознак можна використати двовибірний алгоритм Вілкоксона. Формуються дві вибірки, одна з яких $X = x_1, x_2, \ldots, x_n$ є опорною і належить ділянці фону, інша $Y=y_1, y_2, \ldots, y_m$ – робоча. Вхідні Y елементи можуть бути як пікселями фону, так і пікселями шуканого зображення, тобто до складу вектора Y включені ті пікселі, які відповідають очікуваному положенню об'єкта, що цікавить (табл. 15.4).

Таблиця 15.4

Двовибірний алгоритм Вілкоксона

Без локальних контурних ознак										
R_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i	3	4	5	6	8	9	11	13	15	18
З локальними контурними ознаками										
R_i	1	2	3	7	8	9	10	11	12	13
y_i	3	4	5	11	13	15	18	24	24	24

Складаються два варіаційні ряди – один для елементів опорної X вибірки, а другий для робочої Y вибірки. Ранги елементів робочої вибірки визначаються з урахуванням рангів елементів опорної вибірки, тобто для тих елементів робочої вибірки y_i, які збігаються (або близькі) до елементів опорної вибірки x_i , зберігаються ті ж самі ранги. Значення яскравості y_i пікселів, що відносяться до зони A, перевищують x_i, тому вони потраплять у кінець варіаційного ряду з новими (більшими) номерами (рангами), а у загальній послідовності номерів відбудеться стрибок, зникнуть ранги 4, 5, 6.

Далі визначається рангова статистика $R = \Sigma R_i$, порівняння якої з порогом R_0 призводить до вирішення про наявність чи відсутність локальних контурних ознак згідно з правилом:

$R \geq R_0$ – локальні контурні ознаки є, (15.1)

$R \leq R_0$ – локальні контурні ознаки відсутні. (15.2)

У розглянутому прикладі $R = 55$, якщо локальні контурні ознаки відсутні, і $R = 76$, якщо локальні контурні ознаки є. За відсутності локальних контурних ознак елементи обох векторів *X* та *Y* утворюють однорідну множину випадкових величин, що підкоряються одному і тому ж закону розподілу *w(x)*.

У цьому випадку елемент робочої вибірки з рівними шансами займає будь-яке положення у варіаційному ряді, а це означає, що випадкова величина R_i підпорядковується рівноймовірному закону розподілу:

$$w(R_i) = \frac{1}{(n+1)}, R_i = 0,1,2, \dots, n \quad (15.3)$$

На даний розподіл не чинить впливу конкретний вид розподілу некорельованого фону *w*(*x*).

Закон розподілу w(R_i) вирішальної статистики *R* при фактичній відсутності в *Y* яскравісного перепаду не залежить від розподілу фону *w*(*x*).

Отже, від *w*(*x*) не залежить і ймовірність помилкового виявлення локальних контурних ознак, яким відповідає верхня умова у процедурі $R \geq R_0$.

Для практичного застосування особливо важливо, що і вибір порогу рангової процедури R_0, який підпорядковують вимозі отримання бажаної величини ймовірності помилкового виявлення, також не пов'язаний із розподілом фону *w*(*x*).

Таким чином, застосування рангового алгоритму автоматично стабілізує ймовірність помилкового виявлення, роблячи її незалежною від виду та параметрів закону розподілу фону. Ця властивість досягається тільки за умови, що всі випадкові величини, що утворюють вибірки *X* та *Y*, незалежні. В іншому разі в закон розподілу *w(R)* будуть входити параметри, що описують залежність елементів.

За наявності об'єкта *A* елементи вектора *Y* статистично перевищують елементи *X*, тому закон розподілу рангу $w(R_i)$ перестає бути рівномірним: імовірності великих значень R_i збільшуються за рахунок зменшення ймовірностей малих значень. Ця тенденція проявляється тим сильніше, чим більша величина яскравісного перепаду.

15.5. Декореляція фону

На зображенні ділянки лісу з просікою яскравості пікселів фону залежні статистично, це типово для багатьох зображень випадкового фону. Тому для коректного використання рангового алгоритму необхідно перетворити зображення. Будемо вважати, що яскравості пікселів фону на рис. 20.3 підпорядковуються нормальному закону розподілу, для якого незалежність і некорельованість

елементів зображення еквівалентні один одному, тому перетворення зображення зводиться до декореляції фону.

Нехай фон є однорідним та ізотропним випадковим полем, у якого статистичні характеристики однакові по рядках і стовпцях.

Як модель фону (крона дерев) використовуємо чотириточкову модель:

$$f(i,j) = \alpha[f(i-1,j) + f(i,j-1) + f(i+1,j) + f(i,j+1)] + z(i,j), \quad (15.4)$$

де *i* та *j* – номери рядків і стовпців;
α – параметр, що характеризує ступінь впливу сусідніх відліків на даний відлік поля *f(i, j)*;
z(i,j) – випадкове поле з нормальним законом розподілу та некорельованими відрахунками.

Для декореляції фону використовуємо таку процедуру [52]:

$$g(i,j) = f(i,j) - \alpha[f(I-1,j) + f(i,j-1) + f(i,j+1)] = z(i,j)).$$
$$\begin{vmatrix} 0 & -\alpha & 0 \\ -\alpha & 0 & -\alpha \\ 0 & -\alpha & 0 \end{vmatrix}. \quad (15.5)$$

Декореляція здійснюється шляхом обробки зображення ковзним вікном та враховує конфігурацію сусідніх підрахунків.

Результат цієї обробки за відсутності локальних контурних ознак збігається із породжуючим процесом *z(i,j)*, який за властивостями своєї кореляційної функції близький до білого шуму. Для того, щоб при виявленні локальних контурних ознак використовувати незалежну вибірку, її відліки слід розташовувати так, щоб їх взаємна кореляція дорівнювала нулю.

Вид сигналу, що пройшов через процедуру декореляції, залежить від значень параметра α, тому зупинимося на їх визначенні. Приймемо умову однаковості характеристик зображення по рядках і стовпцях. Параметр α бере участь у процедурі декореляції, тому його вибір необхідно підпорядкувати мінімізації помилок декореляції [39].

$$\langle [g(i,j) - z(i,j)]^2 \rangle \quad (15.6)$$

враховуючи, що

$$\langle z(i,j) \rangle = 0, \langle |z(i,j)|^2 \rangle = \sigma_z^2, \langle [f(i,j) - \langle f(i,j) \rangle]^2 \rangle = \sigma_f^2 ,$$

причому коефіцієнт кореляції між сусідніми відліками дорівнює

$$\langle (f(i,j) - \langle f(i,j) \rangle) \cdot (f(i,j+1) - \langle f(i,j) \rangle) \rangle = \sigma_f^2 \cdot \rho, \quad (15.7).$$

де ρ – нормований коефіцієнт кореляції між сусідніми пікселями фону.

Як модель коефіцієнта кореляції приймемо вираз:

$$\langle (f(i,j) - \langle f(i,j)\rangle) \cdot (f(I+n, j+m) - \langle f(i,j)\rangle)\rangle = \sigma_f^2 \cdot \rho\sqrt{n^2+m^2}\,, \quad (15.8)$$

при цьому

$$\langle [z(i,j) - g(i,j)]^2\rangle = \sigma_z^2 + 4\alpha^2\sigma_f^2 - 2\alpha 4\sigma_f^2\rho + 2\cdot 2\alpha^2 4\sigma_f^2\rho_2 + 2\cdot 4\alpha^2 4\sigma_f^2\rho^{\frac{1}{2}}.$$

Прирівнюючи нулю похідну по α лівій частині цього виразу, знаходимо:

$$\alpha = \frac{\rho}{\left(1+2\rho^{\frac{1}{2}}+\rho^2\right)}. \quad (15.9)$$

Процедура декореляції впливає на сигнальну (*A*) складову зображення. Слід оцінити зміну яскравісного перепаду, що відбувається під час цього впливу. Уявімо повну модель вихідного зображення *h(i,j)* у вигляді суми безперервної (фонової) складової *f(i, j)* і ступінчастої функції *s(i, j)*, яка описує яскравісний перепад:

$$h(i,j) = s(i,j) + f(i,j). \quad (15.10)$$

Для зображень, поданих на рис. 15.23 та 15.24, значення коефіцієнта кореляції ρ лежать у межах $0{,}9 < \rho < 1$. Цьому відповідає $0{,}25 < \alpha < 0{,}255$.

Зміна параметру α у таких невеликих межах незначно змінює відгук оператора декореляції на яскравісний перепад *s(i, j)*. Нижче наведено переріз вихідного сигналу, розрахований при $\alpha = 0{,}25$ [39]:

$$\begin{vmatrix} 0 & -0.25 & 0 \\ -0.25 & 1 & -0.25 \\ 0 & -0.25 & 0 \end{vmatrix} = 0.25 \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Лінія локальних контурних ознак перетвориться фільтром Лапласа, причому яскравість всіх елементів ділиться на 4, множник 0,25 не є принциповим, його можна упустити.

Питання для самоконтролю

1. Що розуміють під терміном "класифікація"?
2. Що розуміють під терміном "некерована класифікація"?
3. Що розуміють під терміном "керована класифікація"?
4. Охарактеризуйте методи непараметричної класифікації.
5. Охарактеризуйте методи параметричної класифікації.
6. Охарактеризуйте метод головних компонент.

XVI. ОСНОВНІ ОПЕРАЦІЇ ТА РІВНІ НАЗЕМНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ СУПУТНИКОВОЇ ЗЙОМКИ

Дані ДЗЗ сьогодні доступні широкому загалу користувачів як в науці, так і на виробництві, використовуються в різних галузях людської діяльності: картографії, екології, територіальному плануванні, управлінні територіями, сільському і лісовому господарствах, промисловості, кадастрах, для пошуку та освоєння нових родовищ корисних копалин, моніторингу надзвичайних ситуацій тощо. Крім того, дані ДЗЗ є основним джерелом актуальних і оперативних даних для геоінформаційних систем (ГІС). Однак для того щоб отримати інформацію з даних ДЗЗ, потрібно провести їх обробку.

Одним з ключових напрямків еволюціонування МДЗ за останні 30 років стало підвищення їх "дружелюбності" по відношенню до кінцевого користувача. Постачання "сирих" супутникових знімків у внутрішніх форматах операторів супутникових проєктів, що вимагають застосування специфічного і доволі складного програмного забезпечення, поступово відходять у минуле.

На порядку денному – уніфіковані формати і рівні обробки, стандартне програмне забезпечення. Прагнення до максимальної завершеності спричинило створення так званих "коробкових" продуктів, які передбачають передачу споживачу повністю готових до галузевого використання МДЗ: що пройшли фотограмметричну і радіометричну обробку, геокодованих з гарантованою точністю, поданих у стандартних геоінформаційних форматах.

16.1. Загальні відомості про наземну обробку даних

Сьогодні визначилося два основні напрямки використання даних ДЗЗ. До першого відноситься напрямок, орієнтований на інтерпретацію зображень, а до другого – напрямок отримання кількісних характеристик об’єктів дослідження. В цьому разі зображення розглядається як зручний спосіб подання даних. Оскільки дані ДЗЗ сьогодні подаються головним чином у цифровій формі, то проблема обробки й інтерпретації даних ДЗЗ тісно пов’язана з цифровою обробкою зображень.

Дані, що отримуються за допомогою ДЗЗ, дають фахівцям надзвичайно інформативний матеріал, який має низку переваг: велику оглядовість, високий ступінь генералізації, порівняно високий рівень розрізненності і можливість регулярного отримання. Ці дані дозволяють у глобальному, регіональному і навіть локальному масштабах досліджувати будову як планети взагалі, так і окремих її територій, вирішувати найважливіші проблеми теоретичної геології, географії, геодезії та астрономії.

Дані ДЗЗ – це просторові, координатно-прив’язані дані про поверхню Землі і об’єкти, що знаходяться на ній. У зв’язку з цим при їх обробці потрібно враховувати кривизну Землі, рефракцію атмосфери тощо. Оскільки дані ДЗЗ можуть бути

отримані з різних космічних знімальних систем, то необхідне урахування викривлень, пов'язаних з обертанням Землі. Між чутливим сенсором і об'єктом зйомки лежить величезний шар атмосфери, тому потрібна ще й корекція впливу атмосфери.

16.2. Основні операції наземної обробки даних супутникової зйомки

Успіх застосування МДЗ багато в чому визначається професійно проведеною наземною обробкою.

Оброблення знімків починається з процедури отримання та реєстрації первинних даних, тобто необроблених, отриманих технічними засобами ДЗЗ [2].

Космічні системи ДЗЗ на наземні станції прийому надають знімки в двох формах – *аналоговій* (двовимірне зображення) і *цифровій*.

Аналоговий знімок (аналогові дані) – це безперервне півтонове чорно-біле або кольорове зображення, розподіл яскравостей якого визначають аналоговою функцією.

Цифровий знімок (цифрові дані) – упорядкована безліч окремих дискретних елементів – пікселів, що несуть інформацію про просторовий розподіл світлової енергії, яка падає на чутливий шар фотоприймального пристрою і дозволяє відтворити (візуалізувати) двовимірне зображення об'єкта зйомки.

Цифрові знімки одержують за допомогою дискретних систем зйомки на борту супутника ДЗЗ або при цифруванні аналогових знімків у растровому форматі. Цифрові знімки придатні для їх автоматизованої обробки з використанням комп'ютерної техніки.

Цифрові супутникові знімки, отримані методами ДЗЗ із космосу, відрізняються від зображень загального призначення низкою особливостей [2]:

– *це файли великих об'ємів* (від десятків мегабайт до одиниць гігабайт, залежно від просторового й радіометричного розрізнення, розмірів сцени зйомки, кількості спектральних каналів тощо);

– *це найчастіше багатозональні або гіперспектральні знімки*, кількість спектральних каналів (зон) яких знаходиться в діапазоні від десятків до сотень і які не можна трактувати як кольори зображення, що створює додаткові проблеми візуалізації таких зображень;

– *це просторова координатно-прив'язана (зв'язана з певною територією) інформація*, що зумовлює потребу врахування географо-геодезичних складових (картографічні проєкції, координатні системи тощо);

– *на якість матеріалів супутникової зйомки впливають атмосфера, кривизна Землі, рух знімальної апаратури відносно поверхні зйомки та інше*, що потрібно враховувати при їх використанні.

Апаратура та програмні засоби наземного інформаційного комплексу системи ДЗЗ повинні забезпечувати радіоприйом, демодуляцію, декодування, декомутацію, реєстрацію, нормалізацію та тематичну обробку інформації (рис. 16.1) [27].

Прийом інформації полягає у виділенні наземними радіотехнічними засобами супутникової системи ДЗЗ просторових та спектральних радіосигналів, що випромінюються бортовим радіопередавачем супутника спостереження та містять іконічні дані [24].

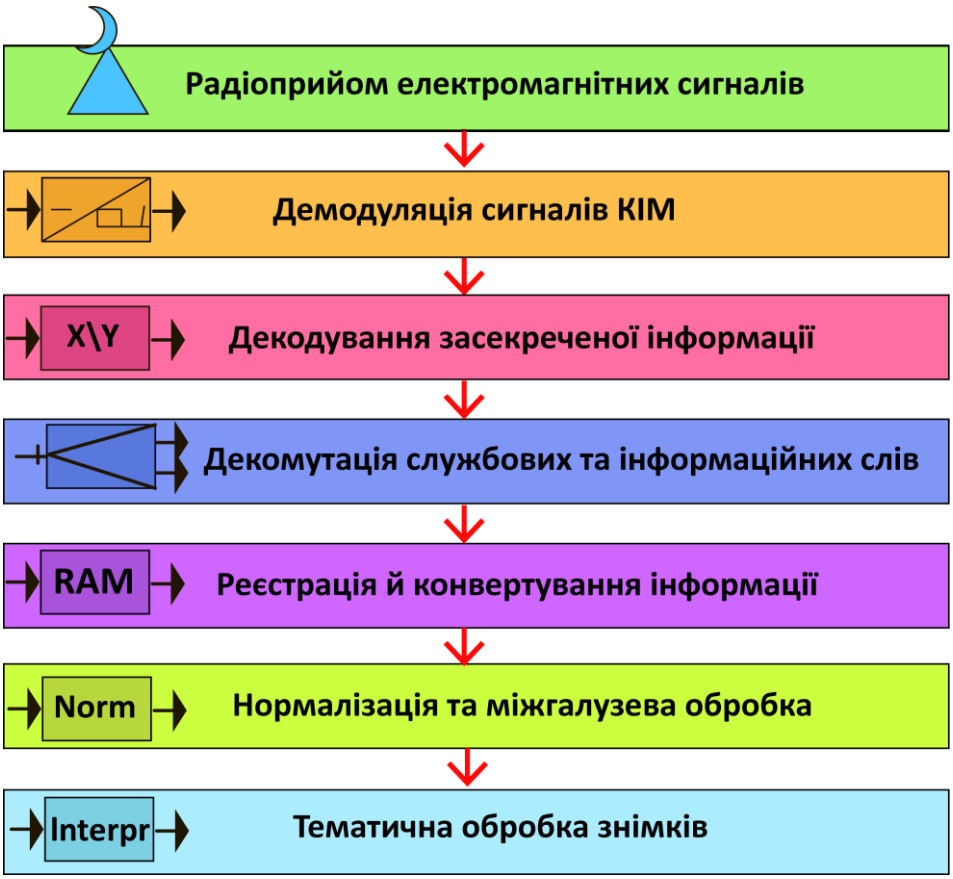


Рис. 16.1. *Основні операції наземної обробки даних космічного спостереження*

Просторове виділення радіосигналів забезпечується спрямованими властивостями антен наземних приймальних станцій, а спектральне – частотною вибірковістю їх приймальних каналів.

Демодуляція полягає у перетворенні прийнятого радіосигналу на проміжній частоті з інформацією, що закодована в ньому методом кодово-імпульсної модуляції (КІМ), на послідовність відеоімпульсів, що надходять до апаратури (програмно-технічні засоби) декодування.

Декодування. Інформація надходить дискретно (порціями) – інформаційними кадрами, кожен з яких містить службові та інформаційні слова, що несуть зображення та їх паспорти. На підставі контрольних сум, що містяться в службових словах, апаратура декодування повинна виявити збої в прийнятій інформації та, за можливості, їх усунути на основі наявного надлишкового завадостійкого кодування інформаційного кадру. У разі нормального відтворення інформаційне кодування підлягає декодуванню для зняття секретного коду.

Декомутація. Після розсекречування інформаційний кадр поділяється апаратурою декомутації на службові та інформаційні слова. Інформаційні слова поділяються на слова опису інформації (паспорти) та слова, що несуть зображення від різноманітних датчиків, каналів та смуг огляду. Апаратура декомутації розподіляє вхідний потік інформаційних слів на окремі потоки для наступної обробки. З потоком вхідної інформації здійснюється низка операцій (селекція та вибір спектральних каналів; вибір смуги огляду; суміщення інформації датчиків різного

типу тощо). При цьому кожному файлу зображення у паспорт додаються результати декодування і декомутації.

Реєстрація та конвертування інформації. Вся інформація з виходу приймально-демодулюючої системи надходить під час сеансу зв'язку до системи реєстрації та конвертування, основу якої складає високошвидкісна апаратура запису [93; 80].

У процесі запису здійснюється додаткове кодування, а при зчитуванні – декодування.

При здійсненні запису та зчитуванні повідомлень потрібно виконати й низку інших перетворень (зміна форми подання, розподілу за каналами та носіями тощо).

Операція реєстрації цифрової інформації передбачає:

– проміжну реєстрацію даних з виходу приймально-демодулюючої системи на реєстраторах з високою щільністю запису;

– формування заголовків вхідної інформації;

– поканальне введення в робочі станції конвертування.

Операції конвертування цифрової інформації передбачають:

• уточнення параметрів орбіт космічних апаратів за даними НАКУ;

• формування паспортів знімків;

• визначення параметрів характеристичних рівнянь первинних вимірювальних перетворювачів при зчитуванні та цифруванні відеоінформації з носія;

• перезапис інформації на стандартні носії;

• автоматичне формування кадрів заданого формату з урахуванням характеристик апаратури конкретного космічного апарата;

• передачу законвертованих кадрів на станції нормалізації.

Конвертування може поєднуватись з оперативним переглядом інформації сеансу зв'язку з космічним апаратом. Оперативний перегляд здійснюється з метою відбракування кадрів, непридатних для подальшої обробки (через недостатню видимість або через збої). Оперативний перегляд дозволяє виключити подальшу обробку кадрів, які не містять корисної інформації.

Нормалізація цифрових знімків передбачає виконання таких операцій:

– геометричне корегування отриманих зображень;

– просторову прив'язку та картографічне трансформування знімків за паспортними даними;

– фотограмметричну обробку стереопар знімків;

– радіометричне корегування прийнятих даних, які спотворені через вплив атмосфери;

– усунення імпульсних завад та збоїв;

– складання анотацій до цифрових даних;

– оформлення кадрів необхідними атрибутами (контрольна напівтонова шкала, мітки тощо);

– реєстрацію нормалізованих даних на стандартних носіях.

Систематичні викривлення знімків корегуються за допомогою калібрувальних даних, що отримуються в процесі наземних випробувань знімальної апаратури або за даними, що вимірюються в процесі зйомок на борту космічного апарата.

Нерегулярні радіометричні викривлення виправляються наближено шляхом статистичних оцінок однорідності сигналів у сусідніх рядках сканування.

Нерегулярні геометричні викривлення (зокрема й ті, що викликані рухом супутника в процесі зйомок) оцінюються і виправляються з використанням траєкторних вимірів положення, орієнтації та швидкості польоту супутника під час зйомки і за так званими опорними точками місцевості. Опорними точками місцевості обираються природні та штучні об'єкти земної поверхні, які легко виявляються на знімках та картах місцевості, для яких точно відомі геодезичні координати: перехрестя доріг, дамби, аеродроми, окремі будівлі тощо.

У результаті нормалізації одиничних знімків створюються повністю або частково виправлені (нормалізовані) знімки, які приведені до визначених картографічних проєкцій (ортознімків) та геодезичних координат земної поверхні.

Внаслідок корекції стереопар утворюються горизонтальні стереопари, які приведені до геодезичних координат, що дозволяє суміщати відтворену за стереопарою цифрову модель рельєфу (ЦМР) місцевості з відповідною ділянкою земної поверхні.

Знімки супроводжуються текстовими анотаціями про платформу-носія, знімальну апаратуру, час та умови зйомки тощо.

При повній корекції виправляються геометричні та радіометричні викривлення, при частковій – тільки радіометричні викривлення та готуються дані, необхідні для наступної геометричної корекції. Зазвичай реалізують декілька рівнів нормалізації – від найпростішого радіометричного коригування до якості ортознімка, щоб замовник, який виконує конкретне завдання, міг обрати найбільш прийнятний за вартістю, часом та точністю подання даних рівень.

На виході системи нормалізації відхилення фактичного положення кожного елемента кадра від його теоретичного положення не повинно перевищувати 0,5 кроку елемента просторового розрізнення. Радіометричні викривлення повинні коригуватися до кінцевої похибки не більше 0,5 % від максимальної яскравості зображення.

Нормалізовані знімки направляються на тематичну обробку, яка передбачає проведення наступних операцій:

1. Точна прив'язка та геометричне корегування і трансформування проєкцій, тобто:

– виконання підготовчих операцій (при цьому повинні бути отримані рівняння картографічного трансформування);

– точна прив'язка зображень до опорних точок на місцевості та підвищення точності розташування елементів кадру;

– обробка трансформованих з точністю просторової прив'язки зображень в задану картографічну проєкцію.

2. Точне радіометричне корегування, а саме:

– підвищення абсолютної радіометричної точності зображення шляхом урахування даних калібрування спектральних каналів;

– зменшення похибок у яскравості елементів зображення, що виникають через низьку прозорість атмосфери (серпанок).

3. Покращання сприйняття зображень, тобто:

– виконання низки операцій з покращання зображень (локальне контрастування, підкреслювання контурів, кольоросинтезування в псевдокольорах або несправжніх кольорах, лінійна й нелінійна комбінації спектральних каналів, виділення ланок однорідної інтенсивності або кольору тощо);

– перетворення зображень з метою підвищення ефективності їх візуального сприйняття (виділення дрібних деталей, вирівнювання гістограм);

– дешифрування (розпізнавання та класифікація об'єктів) зображень.

Проведений аналіз операцій обробки іконічних даних супутникової зйомки дозволяє згрупувати їх таким чином:

а) прийом, демодуляція, декомутація, декодування, реєстрація – виконуються під час сеансу радіозв'язку (в реальному масштабі часу) із супутника, однак слід мати на увазі, що зазвичай це відбувається не під час, а після проведення зйомки;

б) оперативний перегляд та конвертування – виконуються одразу після сеансу радіозв'язку і є попередньою обробкою зареєстрованої в сеансі зв'язку інформації;

в) етап нормалізації проходять всі придатні для обробки знімки. Всі одержані в сеансі прийому знімки мають ті чи інші викривлення, тому технологічний потік нормалізації для всіх знімків сеансу вибирається однаковим;

г) тематична обробка передбачає виконання операцій точної прив'язки, точного геометричного корегування і трансформування проєкцій, точного радіометричного корегування та покращання сприйняття знімків, дешифрування з метою одержання цільової (тематичної) інформації та оформлення звітних документів.

Тематична обробка обов'язково включає тільки операції дешифрування та оформлення звітних документів, а решту операцій проводять за потребою відповідно до цільового завдання.

Якщо тематичній обробці підлягає велика кількість знімків і потрібно провести для них однакову переддешифрувальну підготовку, то із тематичної обробки іноді виділяють етап валової обробки, який містить у собі всі операції переддешифрувальної підготовки знімків: точну прив'язку, точне геометричне корегування і трансформування проєкцій, точне радіометричне корегування та покращання сприйняття знімків.

Таким чином, *завдання обробки зображень є доволі складними і різноманітними*. Частина з них пов'язана з поліпшенням візуальної якості зображень, коли змінюється лише напівтоновий зміст останніх (завдання фільтрації перешкод, нелінійного перетворення шкали яскравості, підкреслення контурів, компенсації розмивів, нанесення службової інформації тощо). Частина відноситься до геометричних перетворень космічних зображень, у ході яких змінюється тільки координатний опис зображень (завдання компенсації похибок, викликаних кривизною Землі, атмосферною рефракцією, оптичною дисторсією, деформацією магнітної плівки чи фотоплівки тощо, а також завдання трансформування зображень (перетворення зображень з нахилених проєкцій на горизонтальні або одержання їх картографічних проєкцій)).

Усе це завдання попередньої обробки космічних зображень, хоча більшість з них можуть мати й самостійне значення. Така обробка передбачає: в картографії –

виконання стереовимірів за знімками, що перекриваються, порівняння фотозображень однієї і тієї ж місцевості, що відносяться до різних періодів часу з метою відновлення карт, детального розпізнавання об'єктів штучного і природного походження, отриманих на знімках (топографічне дешифрування) тощо; у геоботаніці і ґрунтознавстві – розрізнення складу, фенологічного розвитку і стану рослинності, оцінка складу і вологості ґрунтів, визначення структури землекористування (тематичне дешифрування) тощо; у гідрології – картографування гідрографічної мережі, снігового і льодового покривів, виявлення характеру течії і руслової діяльності річок у період між зйомками, термальну, мінералогічну і промислову характеристику вод, вивчення складу гідрографічних об'єктів під час повеней, виявлення лавинної чи селевої небезпеки, тайфунів, смерчів тощо. Для виконання більшості завдань топографічного і тематичного дешифрування потрібне використання спектрометричних методів ДЗЗ [2; 80].

Прогрес радіоелектроніки, авіаційної та космічної техніки дозволив суттєво підвищити якість космічного процесу спостереження. Разом із цим з'явилися нові проблеми в напрямку оцінювання стану об'єктів супутникової зйомки за їх зображеннями. Основною проблемою є невідповідність відомих методів і методик обробки аеро- та супутникових знімків, орієнтованих насамперед на використання фотоматеріалів та характеристик і специфічних властивостей нових засобів отримання, зберігання і подання даних на основі цифрових технологій. Вирішення цієї проблеми є метою багатьох фірм-розробників інструментальних програмно-технічних засобів, призначених для автоматизованої обробки супутникових знімків.

16.3. Рівні наземної обробки даних супутникової зйомки

Обробка даних ДЗЗ *(image processing)* ***– процес здійснення операцій над МДЗ, що передбачає їх корегування, перетворення й покращання, дешифрування і візуалізацію.***

Визначення і стандартизація підходів до виду наданої супутникових даних були доволі складним завданням протягом багатьох років з моменту появи перших комерційно доступних систем ДЗЗ з космосу.

Завдяки узгодженим зусиллям основних світових космічних агентств з поширення даних ДЗЗ вдалось стандартизувати підходи до рівнів обробки надаваних ними матеріалів супутникових зйомок. Під егідою заснованого в 1984 р. Комітету із супутникових спостережень Землі (*англ. Committee on Earth Observation Satellites – CEOS*) 28 космічних агентств прийняли єдиний набір рівнів обробки матеріалів супутникових зйомок. Проте, незважаючи на це, певна плутанина і неясність з рівнями обробки все ще залишаються. Це відбувається через те, що деякі космічні агентства, ґрунтуючись на прийнятих стандартних рівнях, запроваджують власні позначення цих рівнів.

У табл. 16.1 наведено опис ієрархічної структури стандартних рівнів обробки матеріалів супутникових зйомок земної поверхні.

Починаючи з рівня *1A*, кожний наступний рівень базується на попередньому, з додаванням певних радіометричних або геометричних перетворень.

Таблиця 16.1

Міжнародна класифікація рівнів обробки і подання даних ДЗЗ із космосу

Стандартний рівень	Опис	Формат зображення	Формат метаданих
1	*2*	*3*	*4*
0	Абсолютно "сирі" (англ. Row Data) дані, що містять інформацію з ПЗЗ-датчиків у процесі зйомки, без будь-яких перетворень. Інформація може мати стиснення. Даний рівень є базовим для формування наступних рівнів обробки. Зазвичай агентства не розповсюджують дані цього рівня. Використовується головним чином з метою вивчення роботи знімальних систем	Не визначений	Не визначений
1A	Включає тільки радіометричне корегування викривлень, викликаних різницею в чутливості окремих ПЗЗ-датчиків системи сканування. Жодні геометричні виправлення для зображень цього рівня не виконуються, тому вони залишаються практично необробленими або "сирими". Надаються коефіцієнти абсолютного радіометричного калібрування. Матеріали даного рівня рекомендовані для наступної фотограмметричної обробки строгими методами	RAW, TIFF	CEOS, XML
1B	Включає радіометричне корегування, як і рівень обробки 1A, а також геометричне корегування систематичних похибок ПЗЗ-датчиків сканувальної системи, зокрема панорамні викривлення, які викликані обертанням і кривизною Землі, коливанням висоти орбіти супутника. Застосовується абсолютне радіометричне калібрування. Зображення рівня 1B іноді називають "path-oriented". Додатково можуть бути надані файли, які містять коефіцієнти раціонального багаточлена (RPC), що апроксимують геометрію зображення. Матеріали можуть бути використані для фотограмметричної обробки як строгими методами, так і апроксимаційними	RAW, TIFF	CEOS, XML, ASCII
2A	Зображення, як правило, приведені до стандартної картографічної проєкції без використання наземних опорних точок. Проектування зображення виконується на середню площину або використовується глобальна цифрова модель рельєфу (DEM) з кроком на місцевості 1 км. Можуть надаватись файли, які містять коефіцієнти раціонального багаточлена (RPC), що апроксимують геометрію зображення	GeoTIFF	XML, ASCII
2B	Зображення рівня 2A приведені до стандартної картографічної проєкції з використанням наземних опорних точок. Проектування зображення виконується на середню площину або використовується глобальна цифрова модель рельєфу (DEM) з кроком на місцевості 1 км. Можуть надаватись файли, які містять коефіцієнти раціонального багаточлена (RPC), що апроксимують геометрію зображення	GeoTIFF	XML, ASCII
3 A	На відміну від рівня 2B, зображення рівня 3 A проєктуються в задану картографічну проєкцію шляхом ортотрансформування з використанням з певної точності. Отримані зображення є ортоскорегованими з певною точністю. Зображення зазвичай нарізаються на стандартні картографічні аркуші	GeoTIFF	XML, ASCII
3B	Рівень 3B передбачає об’єднання зображень рівня 3A в єдині безшовні растрові мозаїки, що покривають великі території	GeoTIFF	XML, ASCII

Згідно зі стандартом України [14], потрібно використати такий набір рівнів обробки зображень ДЗЗ:

0 – рівень обробки даних ДЗЗ (*попередня обробка*) передбачає операції розпакування цифрового потоку від знімальних приладів та спектральних каналів, змістом якого є формування вихідного зображення (растрової структури) з первинних даних і доповнення його необхідними метаданими.

Файли цих даних прив'язані до бортової шкали часу супутника й супроводжуються доступною допоміжною інформацією (наприклад, ефемериди супутника, стан апаратури тощо);

1 – рівень обробки зображень (*нормалізація*), змістом якого є операції координатної прив'язки зображення за орбітальними даними носія знімальної апаратури, розділення за кадрами (сценами) й оцінку якості рядків зображення; проведення радіометричної корекції та корекцію збійних пікселів цифрового зображення; проведення операцій геометричної корекції супутникових знімків;

2 – рівень обробки зображень (*міжгалузева обробка*), змістом якого є його просторова прив'язка з використанням наземних опорних точок.

Міжгалузева обробка залежно від глибини обробки поділяється на окремі рівні і передбачає:

– проведення операції перерахунку координат зображення у визначену картографічну проєкцію;

– здійснення операцій повної радіометричної корекції зображення;

– здійснення операцій повної геометричної корекції зображення, орторектифікації (гр. *ortos* – прямий, правильний + *rectificatio* (лат.) – виправлення) зображення.

Орторектифікація – це перетворення знімка на планіметричне зображення, які усувають геометричні спотворення на зображенні, зумовлені орієнтацією камери (сенсора), впливом рельєфу й кривизни Землі, а також похибками математичної моделі зображення;

3 – рівень обробки зображень (*тематична обробка*), змістом якого є набуття значень дешифрувальних ознак або визначення фізичних параметрів об'єктів зондування, формування тематичних шарів просторової інформації у вигляді графічних і текстових матеріалів, формування просторових моделей, тематичних карт, геоінформаційних проєктів на основі оброблених супутникових знімків на електронних і / або паперових носіях.

На даний час у науково-технічній літературі з метою спрощення сприйняття та практичного введення вказаних рівнів обробки супутникових знімків спостерігається тенденція визначення їх у загальному вигляді, наприклад:

– *корегований космічний* – знімок, над яким проведено радіометричну корекцію;

– *геокорегований* – знімок, над яким проведено геометричну корекцію;

– *геокодований* – знімок, над яким проведено просторову прив'язку і трансформування зображення в задану картографічну проєкцію без використання наземних контрольних точок;

– *геокодований за місцевістю* – знімок, над яким проведено просторову прив'язку і трансформування зображення в задану картографічну проєкцію з використанням наземних контрольних точок.

Відповідно до рекомендацій Комітету супутникового спостереження Землі (CEOS), повний опис розповсюджуваних продуктів ДЗЗ повинен включати [63]:

– визначення рівня обробки;

– ідентифікацію центру обробки;

– інструмент, за допомогою якого отримані дані;

– фізичний носій, на якому доступні дані і відповідні стандарти;

– використовуваний формат даних;

– процедури калібрування (процес, що кількісно визначає відгук системи на відомий і контрольований вхідний сигнал) і валідації[16];

– інтерфейс із зовнішніми користувачами.

Вихідна продукція космічної системи спостереження Землі видається споживачам в аналоговому вигляді у вигляді твердих копій (чорно-біле або кольорове зображення на папері чи плівці) з текстовою легендою і в цифровому вигляді у формі бази даних (файли, передані інформаційними мережами, записи на магнітних носіях, лазерних дисках тощо), які зазвичай використовуються як один з рівнів географічних даних ГІС.

16.4. Попередня обробка даних ДЗЗ

Одним із найважливіших процесів при перетворенні інформації нульового рівня на інформацію, придатну для наступної інтерпретації і практичного застосування, є *процес координатно-часової прив'язки вимірювальних даних*, який дозволяє досліднику встановити взаємно-однозначну відповідність між значеннями вимірюваних параметрів і спостережуваними фізичними об'єктами, від яких надійшла інформація на реєстратори випромінювання даного приладу. Причому цей процес потрібно виконувати завжди і для всіх приладів, розташованих на борту. Крім даних, які безпосередньо вимірюються в системах приладів спостереження, процес координатно-часової прив'язки вимагає для свого здійснення знання траєкторії руху носія і його орієнтації. Ці дані надходять від наземних служб стеження і бортових систем керування орієнтацією. Створюється додаткове інформаційне навантаження не тільки на пункти прийому, але й на станції стеження.

Сьогодні вже склалась така ситуація, коли оперативну обробку даних ДЗЗ стає важко здійснювати через величезний об'єм інформації і обмежену кількість станцій стеження та пунктів прийому й обробки. В той же час низку доволі складних етапів обробки, зокрема виміру й обробки даних для визначення орієнтації і траєкторії носія, здійснення координатно-часової прив'язки оперативних даних бортових вимірів, можна покласти на комплекс апаратури бортового базування. Приладні засоби для практичної реалізації цих ідей уже створені. Це вимірювальна апаратура супутникових радіонавігаційних систем типу "Navstar", Gallileo і зіркові відеоприлади. Технологія ж, математичне і програмне забезпечення для

[16] **Валідація** – процес, що дозволяє визначити, наскільки точно з позицій потенційного користувача модель подає задані сутності реального світу.

спільного використання даних від цих приладів з метою здійснення координатно-часової прив'язки в повному обсязі поки що не створені.

Вихідна інформація (потік "сирих" даних), що реєструється наземним приймальним центром, являє собою сигнал з супутника у вигляді бітової послідовності, яка містить як результати знімання, так і службову інформацію про рух і орієнтацію космічного апарату, режими роботи знімальної апаратури тощо. При цьому інформаційний сигнал проходить декілька стадій обробки (демодуляція, синхронізація, декодування тощо), частина з яких виконується апаратно, частина – за допомогою програмних засобів приймального комплексу безпосередньо після сеансу зв'язку з супутником. Знаючи формат (структуру) потоку даних, можна витягти з нього відзняті зображення.

Якщо на супутнику функціонує декілька комплектів знімальної апаратури або ведеться знімання в різних режимах, то в наземний приймальний центр одночасно надходить декілька потоків даних. Зазвичай один потік містить інформацію, прийняту одним частотним каналом. Однак деякі супутники, наприклад індійські, серії IRS-1C, -1D, -P6, транслюють зняту інформацію двома радіоканалами.

В наземному приймальному комплексі завдань *попередньої обробки даних ДЗЗ* є розпакування прийнятого потоку даних, витяг зображень і відповідної службової інформації, обробка і подання інформації у форматах збереження.

16.5. Первинна обробка (нормалізація) даних ДЗЗ

Під *первинною обробкою,* або *нормалізацією,* розуміють набір дій (процесів), які перетворюють вихідну інформацію, отриману наземною станцією прийому, на певні продукти ДЗЗ стандартних рівнів обробки, придатні для подальшого використання.

Основним завданням первинної обробки зображень є виправлення отримуваних даних для досягнення якомога правдоподібнішого зображення земної поверхні.

ДДЗ зазвичай містять цілу низку випадкових, системних і систематичних спотворень, пов'язаних із впливом атмосфери, кривизни Землі, руху знімального апарата щодо її поверхні в момент зйомки, фізичними характеристиками використовуваних датчиків і каналів зв'язку.

Характерною важливою особливістю завдань первинної обробки є безумовна вимога їх виконання в темпі надходження даних від систем ДЗЗ. Це, по-перше, пов'язане з високою швидкістю надходження відеоінформації. По-друге, без швидкої попередньої обробки не можна зробити оцінку її якості в плані придатності для подальшого використання й архівації, оскільки вихідна інформація характеризується наявністю просторово-часових викривлень (пропусків і руйнувань), імпульсних перешкод і структурних викривлень.

Первинна обробка – це корегування й покращання супутникових зображень, яка включає в себе:

– геометричне корегування супутникових зображень;
– радіометричне калібрування знімків;
– радіометричне корегування впливу атмосфери;
– відновлення пропущених пікселів;
– контрастування;
– фільтрацію тощо.

Радіаційне відновлення пов'язане з корегуванням кількості електромагнітної енергії, що приймається кожним датчиком, оскільки атмосфера неоднаково пропускає випромінювання різних ділянок спектрального діапазону.

Калібрування (нормалізація) полягає в перетворенні безрозмірних даних, що одержуються з датчиків окремих спектральних зон, на істинні нормалізовані значення відбитої або випроміненої енергії. Ще одна операція радіометричного корегування пов'язана з усуненням викривлень, що вносяться самими датчиками та пристроями передачі і прийому даних (системних викривлень).

Геометричне корегування або трансформування знімків призначено для усунення викривлень, викликаних кривизною та обертанням Землі, а також кутом нахилу орбіти супутника до площини екватора. Цей вид корекції на першому етапі може виконуватись автоматично за інформацією про параметри орбіти супутника. Більш точне трансформування і прив'язка знімка до певної координатної системи зазвичай виконується з використанням опорних точок, що задаються інтерактивно. В процесі трансформування відбувається перерахунок значень пікселів на нову сітку растру, при цьому форми об'єктів на зображенні більшою або меншою мірою змінюються, а рамка знімка із зазвичай прямокутної перетворюється на паралелепіпед або більш складну фігуру з криволінійними межами. Часто для подання і спільної обробки матеріалів різних видів (типів) зйомок, а також різночасових знімків однієї й тієї ж території використовується проєкція, що називається *ортопланом*, яка застосовується в світовій практиці як обмінний стандарт.

При геометричному корегуванні фотографічних зображень високої розрізненності усуваються викривлення, що виникають за рахунок рельєфу місцевості.

Примітка. Треба пам'ятати, що деякі методи покращання зображень (фільтрація, зміна контрасту) передбачають зміну спектральних характеристик знімка, тому після їх застосування не можна застосовувати методи тематичної обробки, які ґрунтуються на аналізі значень спектральної яскравості пікселів (класифікації, арифметичні перетворення каналів тощо).

16.5.1. Геометричне корегування супутникових зображень

Геометричне коригування пов'язане з виправлянням геометричних (просторових) спотворень супутникового знімка.

Геометричне корегування (англ. *geometric correction, geometric rectification, image registration*) **– *корегування, засноване на принципах цифрової фотограмметрії, яке передбачає усунення на зображенні геометричних викривлень (орторектифікація).***

Орторектифікація – трансформування зображення в прийняту картографічну проєкцію для наступної точної географічної ув'язки даних дешифрування з існуючими картографічними матеріалами і геоприв'язки.

В результаті проведення геометричних перетворень координати елементів цифрового знімка пов'язуються з просторовими координатами (геоприв'язка), а знімок трансформується в задану проєкцію.

Координатна прив'язка зображення може здійснюватись шляхом повороту зображення (оскільки осі координат цифрового знімка зазвичай не паралельні ані сітці паралелей і меридіанів, ані сітці прямокутних координат). Для цього використовується метод уведення "чистих" пікселів, який не потребує переналаштування зображення. Існує також низка методів, які здійснюють прив'язку шляхом автоматизованого цифрового трансформування координат. Серед них найбільш поширеними є афінна і поліноміальна (апроксимаційна) моделі перетворення, модель "резинового аркуша" (інтерполяційна) тощо (рис. 16.2) [122].

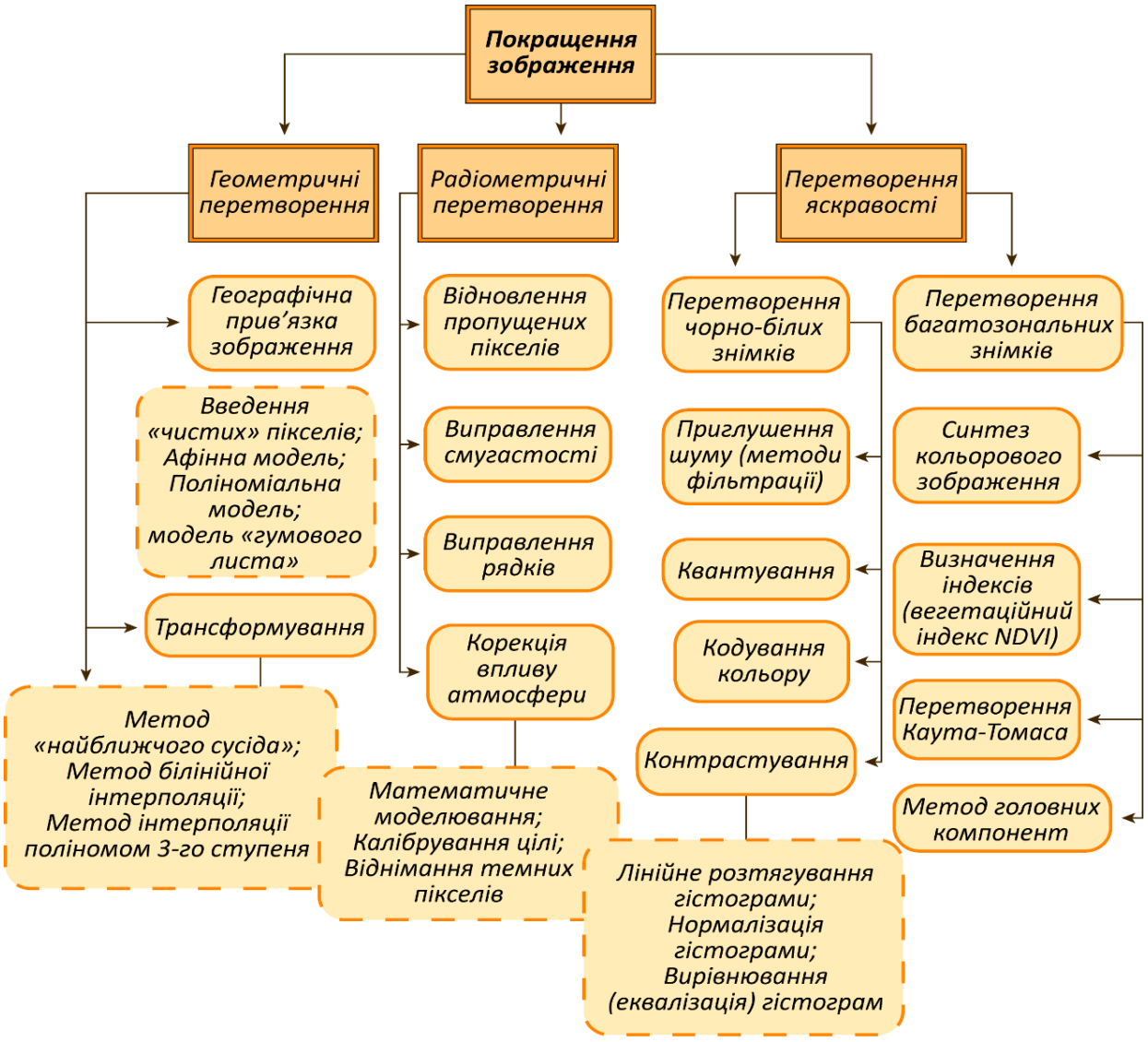


Рис. 16.2. *Ієрархічна структура методів попередніх перетворень зображень ДЗЗ*

Афінна модель дозволяє виправляти лінійні викривлення на зображенні шляхом найпростіших лінійних перетворень (зміна розмірів, поворот, зсув). Даний метод використовується для усунення систематичних помилок, однакових для всіх пікселів зображення. Зокрема, за потреби перетворити растрову версію карти (або вже скореговане зображення) з вихідної на нову картографічну проєкцію.

Використання афінної моделі перетворення також може дати задовільні результати при геометричній корекції отриманого в надирі авіаційного або супутникового зображення невеличкої території з незначною зміною рельєфу місцевості (поверхня наближається до площини, і зміщення внаслідок нахилу місцевості є незначним або взагалі відсутнє). Даний метод потребує щонайменше трьох опорних точок, які не лежать на одній прямій лінії.

Поліноміальна (апроксимаційна) модель, на відміну від афінних перетворень, дає можливість виправляти більш складні викривлення на зображенні, зокрема, використовується для виправлення як лінійних, так і нелінійних геометричних викривлень на знімках. Основною метою даного перетворення є визначення такого полінома апроксимації, який би забезпечив найменше відхилення координат опорних точок зображення від заданих координат. Поліноми різного ступеня визначаються, виходячи із характеру викривлень на зображенні, а також кількості і розосередження опорних точок. Чим вищий порядок апроксимації полінома, тим точніша обробка зображення, однак тим більше для цього потрібно опорних точок, також суттєво зростає складність обчислень.

Для багатьох випадків поліном 1-го або 2-го ступеня є достатнім. Так, апроксимація поліномом першого порядку дозволяє здійснювати лінійні перетворення координат і працювати із зображеннями, що описують невеличкі ділянки земної поверхні (без урахування кривизни земної поверхні). Апроксимація поліномами другого порядку використовується для нелінійних перетворень (наприклад, для переведення даних з географічної системи координат у прямокутні) і є оптимальною при роботі із супутниковими зображеннями великих територій (для урахування кривизни Землі).

Поліном 2-го ступеня дозволяє позбутись викривлень, що йдуть в одному напрямку (увігнутість або опуклість), і тому часто використовується для виправлення радіальних викривлень, що обумовлені формою лінзи камери або Землі, після чого можлива точна прив’язка зображень, викривлених з цієї причини.

Поліноми більш високого ступеня використовуються для корекції складних геометричних спотворень зображення, при цьому, однак, найчастіше відбувається поява викривлень на ділянках між опорними точками, особливо по краях знімка. Мінімальна кількість точок при апроксимації поліномом першого порядку – 3, поліномом другого порядку – 6, поліномом третього порядку – 10. Для забезпечення достатнього рівня точності зазвичай потрібна кількість точок, яка дорівнює подвоєній мінімальній кількості поліномів.

Модель "резинового аркуша" (інтерполяційна) відрізняється від двох попередніх тим, що в її основі лежить використання заданих фіксованих опорних точок зображення, які не змінюють своїх координат у процесі трансформування. При цьому положення інших точок обчислюються на основі інтерполяції

координат. Цей процес можна проілюструвати розтягуванням резинового аркуша з нанесеною на нього координатною сіткою так, щоб визначені точки зайняли положення з певними координатами.

Також виділяється низка спеціальних моделей, які є модифікаціями або комбінаціями різних методів і використовуються для більш ефективної трансформації зображень, серед них метод тріангуляції, раціональних поліномів тощо [116].

За потреби здійснюється монтаж декількох зображень у єдине полотно для суцільного покриття території дослідження даними зондування. Для монтажу потрібно використовувати зображення, що пройшли геометричне корегування.

Геометричне корегування знімків сьогодні стало практично обов'язковим при роботі з МДЗ. Причини цілком зрозумілі. Сьогодні робота з ДДЗ вийшла за межі дослідних лабораторій, де найчастіше важливим було знайти відповідь на поставлене завдання в принципі. На сучасному етапі важливо дати розв'язок, корисний для практики, який можна порівняти з іншими даними, отже, результати використання МДЗ повинні бути подані в реальних координатах, у конкретних картографічних проєкціях або, в крайньому разі, у вигляді, який дозволяє аналізувати дані не тільки по одному знімку. Звичайно, можна спочатку дешифрувати знімок і створити по ньому векторну карту в ГІС, а вже потім займатися прив'язкою до реальних координат і трансформуванням в ту або іншу картографічну проєкцію. Однак за винятком декількох ситуацій такий підхід менш зручний, оскільки не дає можливості комплексувати різні типи зйомок, працювати з різночасовою дистанційною інформацією і спричиняє проблеми на границях знімків.

Треба відрізняти геометричне трансформування знімків від прив'язки знімків. При трансформуванні відбувається геометричне перетворення знімка і перерахунок значень пікселів на нову сітку растра. При цьому форми об'єктів на знімку змінюються в тому або іншому ступені, а кадр (рамка знімка) із зазвичай прямокутного або квадратного перетворюється на паралелепіпед, ромб або навіть більш складну фігуру з криволінійними межами. Само по собі трансформування, однак, ще не дає можливості використовувати знімок спільно з цифровими картами і даними в реальних координатах.

Трансформування дає можливість отримати знімок, який не має геометричних викривлень порівняно з конкретною картою. Потрібно ще "повідомити" знімку інформацію про його прив'язку до реальної координатної системи (абсолютна прив'язка) або про його прив'язку до якоїсь відносної системи координат, наприклад, до іншого знімка (відносна прив'язка). Сама по собі растрова структура зображення (на відміну від векторної) не містить реальних координат пікселів у тій або іншій системі картографічних, геодезичних координат. Останні, однак, можна розраховувати із піксельних координат, якщо знати реальні координати якихось крайніх пікселів зображення і розмір на місцевості одного пікселя. Ось ця інформація, необхідна для розрахунку, й записується у файл зображення або у відповідний йому файл заголовка при прив'язці знімка до реальних координат (при прив'язці до умовних координат роблять подібним чином). Туди ж зазвичай поміщується додаткова інформація про картографічну проєкцію, на яку перетворений знімок, дані про використаний референц-еліпсоїд тощо. На жаль, на сьогодні відсутня уніфікація цієї інформації прив'язки для різних систем, хоча є спроби створення стандартів

обміну. Мабуть, найкращим вирішенням цієї проблеми є можливість отримання її в ASCII-файлах заголовка, що читаються. Так, наприклад, чинить фірма SPOT, постачаючи споживачу свої геокодовані продукти (формат SPOT).

Є різні рівні геометричного трансформування знімків і методики проведення трансформування, які використовують різний математичний апарат і додаткову інформацію. Для деяких типів космічних знімальних систем, таких як LANDSAT, SPOT, існує чітка класифікація стандартних рівнів геометричного трансформування (які зазвичай супроводжуються і певними радіометричними корегуваннями). Ці рівні носять назву рівнів корегування і традиційно розуміються як рівні попередньої обробки. Споживач може замовити знімки з різним рівнем корекції, а може провести корегування й сам, якщо володіє відповідного рівня програмним забезпеченням.

Останній варіант, зрозуміло, обходиться дешевше. В принципі на початковому рівні корекції усуваються систематичні геометричні викривлення, спричинені обертанням Землі, і рамка знімка набуває форми не квадрата, а приблизно ромба. На цьому етапі корегування здійснюється зазвичай з використанням інформації про параметри орбіти супутника без необхідності задання вручну опорних точок, що пізнаються на ньому з точно відомими координатами. Знімок виявляється після такого, по суті, автоматичного процесу уже прив'язаним, але не дуже точно. Більш точну прив'язку можна отримати за рахунок трансформування з використанням опорних точок, що задаються вручну. Нарешті, найвищий рівень геометричної корекції, що робить знімок таким же повноцінним інструментом для геометричних вимірів, як і карта, досягається при ортотрансформуванні, тобто усуненні викривлень, спричинених рельєфом місцевості.

Цей вид корекції на першому етапі може виконуватись автоматично за інформацією про параметри орбіти супутника. Більш точне трансформування й прив'язка знімка до певної координатної системи зазвичай виконується з використанням інтерактивно заданих опорних точок. У процесі трансформування відбувається перерахування значень пікселів на нову сітку растру, при цьому форми об'єктів на зображенні більшою або меншою мірою змінюються, а рамка знімка зі звичайної прямокутної перетворюється на паралелепіпед або більш складну фігуру з криволінійними межами. Часто для подання і спільної обробки матеріалів різних видів (типів) знімань, а також різночасних знімків однієї й тієї ж території використовується проєкція, що називається ортопланом, яка застосовується у світовій практиці як обмінний стандарт. При геометричній корекції фотографічних зображень високої розрізненності усуваються перекручення, які виникають за рахунок рельєфу місцевості.

Причинами геометричних викривлень МДЗ слугують *кривизна поверхні Землі, нерівності рельєфу, обертання Землі та рух космічного апарата в процесі формування зображення.* Ці причини зазвичай діють спільно. Крім того, потрібно зазначити, що для різних типів супутникових знімків комбінація цих причин може бути різною.

1. Кривизна поверхні Землі. Геометричні викривлення знімків, що спричинені кривизною поверхні Землі, утворюються внаслідок того, що точки сканованої місцевості не лежать в одній площині і спостереження ведеться не в надирі, а під кутом до поверхні (рис. 16.3).

Тому у міру віддалення від центральної лінії сканування (де зйомка ведеться в надирі) викривлення форми і розміру об'єктів збільшується [20].

Викривлення форми об'єктів. Пряма лінія на місцевості буде кривою на знімку, квадрат – прямокутником тощо. Цим типом викривлення можна знехтувати, якщо кут огляду сканера невеликий (наприклад, у знімальній системі MSS – Landsat кут огляду приблизно становить 5,8°).

Викривлення масштабу. Для знімків, що виконані оптико-механічним сканером (MODIS, AVHRR, ETM і MSS – Landsat, Aster (TIR)), масштаб при віддаленні від центральної лінії знімка стає дрібнішим. Тобто, якщо взяти два пікселі знімка (один із центральної частини знімка, а другий – з бокової), то піксель з бокової частини буде містити більшу площу поверхні, хоча їх розмір однаковий.

Примітка. Для знімків, отриманих за допомогою приладів ПЗЗ (супутники SPOT, IRS, Ikonos, датчик Aster (VNIR, SVIR)) масштаб при віддаленні від центральної лінії знімка не змінюється.

2. Нерівності рельєфу. Нерівності рельєфу спричиняють ті ж викривлення, що й кривизна поверхні, Землі, але завдання їх усунення складніше, оскільки форми рельєфу значно складніші від форми Землі, яка близька до сфери (рис. 16.4).

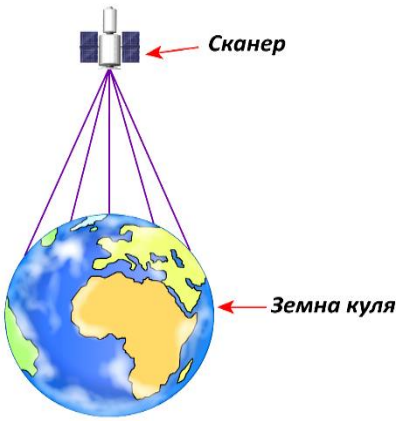


Рис. 16.3. *Геометричне викривлення аерокосмічного знімка, спричинене кривизною поверхні Землі*

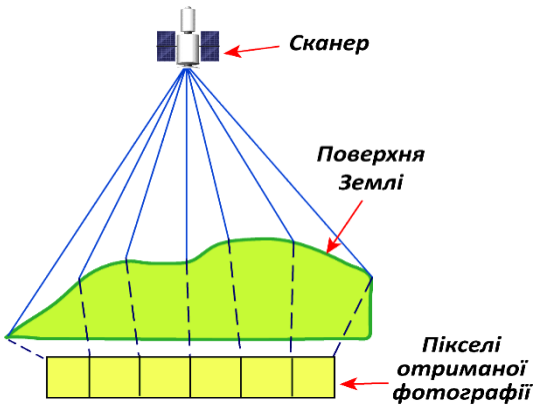


Рис. 16.4. *Геометричне викривлення аерокосмічного знімка, викликане нерівностями рельєфу*

Примітка. Оскільки супутникові знімки виконуються з великої висоти, то вплив форм рельєфу не є значним, тому даний тип викривлень враховують лише для гірських районів.

3. Обертання Землі. Оскільки сканування Землі з космосу відбувається не миттєво, як при фотозйомці, то обертання Землі (за 1 хв Земля повертається на 0,25°) викликає зміну умов зйомки у процесі сканування однієї сцени [36].

4. Рух космічного апарата в процесі формування зображення. На якість і властивості знімків впливає форма та висота орбіти супутника. Наприклад, колова орбіта забезпечує однакову висоту знімання земної поверхні, а отже, для однієї й тієї ж апаратури – однакове охоплення і розрізнення знімків.

Яскравісне корегування знімків передбачає покращення яскравості і контрасту зображення, процедуру еквалізації (виявлення об'єктів, які розташовані в

межах світлих або темних плям зображення), нормалізацію його яскравості. "Придатність" експертно оцінюється дешифрувальником, і результат залежить від його досвіду та кваліфікації.

16.5.2. Радіометричне калібрування (радіометрична корекція) знімків

Радіометричне калібрування (радіометрична корекція) знімків *(англ. radiometric correction, spectral correction)* – ***це калібрування (корекція) значень вихідного сигналу знімального приладу та їх переведення в абсолютні значення альбедо і радіаційної температури.***

Радіометрична корекція – це виправлення апаратних радіометричних викривлень, обумовлених характеристиками використовуваного знімального приладу і середовищем проходження випромінювання (атмосферою).

Радіометрична корекція даних ДЗЗ виконується головним чином двома методами: з використанням відомих параметрів і налаштувань знімального приладу (корегуючих таблиць) або статистично [24]. У першому випадку необхідні корегувальні параметри визначаються для сенсора на основі тривалих наземних і льотних випробувань. У другому випадку покращення досягається шляхом виявлення дефекту і його характеристик безпосередньо з зображення, яке потрібно покращити. Якість покращення в першому випадку вища, на відміну від статистичного методу, оскільки при цьому враховуються особливості сенсора, що створив зображення.

Знімки, що первісно отримуються із супутників, записані у вигляді так званих "сирих значень" яскравості DN (Digital Number). Дані в такому форматі не можна адекватно порівняти з даними інших зйомок.

Завдання радіометричного калібрування полягає у приведенні цих значень у фізичні одиниці. Калібрування здійснюється з використанням даних телеметрії, що надходять із супутника разом із зображенням, і калібрувальних коефіцієнтів, які розраховуються для кожного знімального приладу за результатами наземних та льотних випробувань. Калібрування полягає в перетворенні безрозмірних даних, що отримуються з датчиків окремих спектральних зон, на істинні нормалізовані значення відбитої або випромінюваної енергії.

Формула для калібрування багатозональних знімків в оптичному діапазоні має вигляд:

$$B^*_\lambda = K_\lambda DN + C_\lambda ,$$

де B^*_λ – це енергетична яскравість для спектральної зони λ;
DN – "сирі" значення яскравості;
K_λ – калібрований коефіцієнт;
C_λ – калібрувальна константа, що відповідає мінімальній величині яскравості, що реєструється.

При радіометричному корегуванні можна усунути дефекти збійних пікселів, рядків, що випадають, модуляції (смугастість), викривлення за рахунок впливу атмосфери.

Радіометричне корегування впливу атмосфери. При проходженні крізь атмосферу ЕМХ поглинаються і розсіюються. Причиною поглинання і розсіювання є: озон, водяна пара, вуглекислий газ, кисень, метан, пил, дим (рис. 16.5) [24].

Це суттєво ускладнює залежність між сонячним випромінюванням і випромінюванням, яке визначає сенсор. Корегування параметрів зображення з урахуванням впливу атмосфери на розповсюдження світла здійснюється трьома способами.

По-перше, методом математичного моделювання, коли розсіювання в атмосфері і параметри поглинання розраховуються за допомогою комп'ютерних програм (серед яких найбільш популярними є LOWTRAN і MODTRAN) з урахуванням типів розсіювання в атмосфері, пори року, метеорологічних даних тощо. Для уточнення таких моделей використовують наземний вимір відбивної здатності об'єктів під час польоту супутника.

Рис. 16.5. *Поглинання, розсіювання і хмарність спричиняють викривлення значень яскравості пікселів на знімках*

По-друге, за допомогою калібрування цілі, при цьому потрібно знати показники розсіювання із заданою точністю для певного спектрального діапазону; кожен калібратор повинен забезпечувати охоплення ділянки щонайменше в декілька пікселів у налаштуванні на різні атмосферні умови.

По-третє, шляхом віднімання темних пікселів. Це найпростіший і найбільш уживаний спосіб корегування. Він заснований на припущенні, що піксель із найбільш низьким радіометричним показником яскравості в кожній зоні повинен бути в дійсності нулем, а його ненульове значення є результатом адитивних завад, що викликані атмосферою. Так, наприклад, оскільки хмари і тумани добре видно на фоні води, то в червоній та ІЧ ділянках спектра поверхня води за своїми оптичними характеристиками наближається до абсолютно чорного тіла. Тому вміст наведених чинників можна оцінити і скорегувати за знімками, що включають ділянки морів і океанів.

Хмарність є перешкодою тільки при зніманні в оптичному діапазоні. Поглинання, розсіювання і хмарність спричиняють викривлення значень яскравості пікселів на знімках.

Атмосферна корекція − усуває різні викривлення, викликані наявністю атмосфери.

У процесі попередньої обробки зображення з даних видаляються систематичні радіометричні і геометричні помилки.

Приклад зображення до і після атмосферної корекції наведено на рис. 16.6.

Ось відкоригований текст, який є більш чітким і послідовним:

Покращення зображення дозволяє перетворити його на форму, яка є найбільш зручною для візуального та автоматизованого аналізу. Цей процес використовується для того, щоб підкреслити найважливіші ознаки зображення та полегшити подальшу інтерпретацію даних.

Рис. 16.6. *Зображення до і після атмосферної корекції*

Після того як буде проведена обробка даних ДЗЗ, їх можна використовувати для створення якісної картографічної продукції, наприклад, для оновлення топографічної основи і дешифрування.

Відновлення пропущених (збійних) пікселів. "Пропущені пікселі" можуть виникнути під час зйомки або передачі даних, також трапляється заміна значень яскравості цілого рядка значеннями сусіднього рядка. Такі явища можуть стати перешкодою при тематичній обробці знімка. Пропущені пікселі можна відновити шляхом інтерполяції з певною похибкою (рис. 16.7) [36].

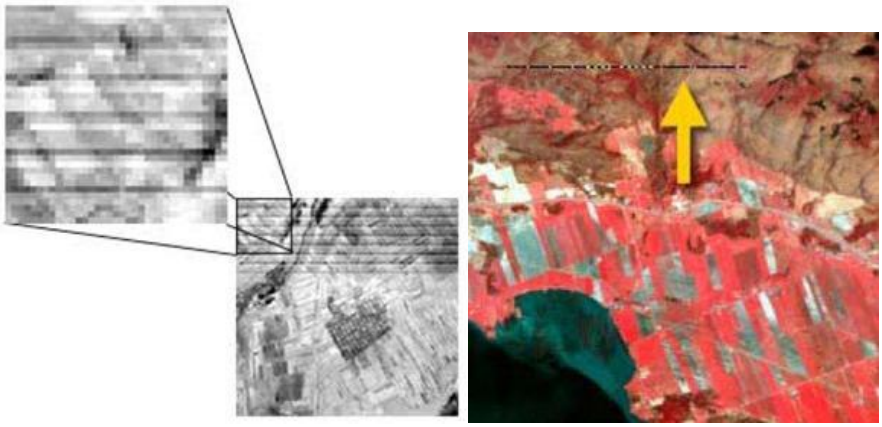


Рис. 16.7. *Відновлення "пропущених пікселів" шляхом інтерполяції*

Модуляція зображення (смугастість) проявляється у вигляді смуг, паралельних або перпендикулярних осі зображення, при цьому ці смуги є непостійними значеннями яскравості, для яких відсутній постійний коефіцієнт похибки або зміщення.

Найчастіше смугастість проявляється на зображеннях однорідних територій (пустелі, водні об'єкти, рослинність). Розроблені різні методи виправлення смугастості: аналіз Фур'є, метод головних компонент тощо. Крім того, сьогодні дана проблема практично усунена в сенсорах нових поколінь. Виправлення рядків, що випали, відбувається у випадку, коли датчик знімального приладу повністю виходить з ладу. Як наслідок, на зображенні створюється смуга з більш високими значеннями яскравості. Рядки, що випали, виправляються заміною на передбачувані значення яскравості, ґрунтуючись на значеннях яскравості рядків вище і нижче від того, що випав.

Яскравісні перетворення спрямовані в першу чергу на покращення візуального сприйняття екранного зображення (покращення яскравості, контрасту). Конкретні методи, що застосовуються при цьому, визначаються завданням, що виконується.

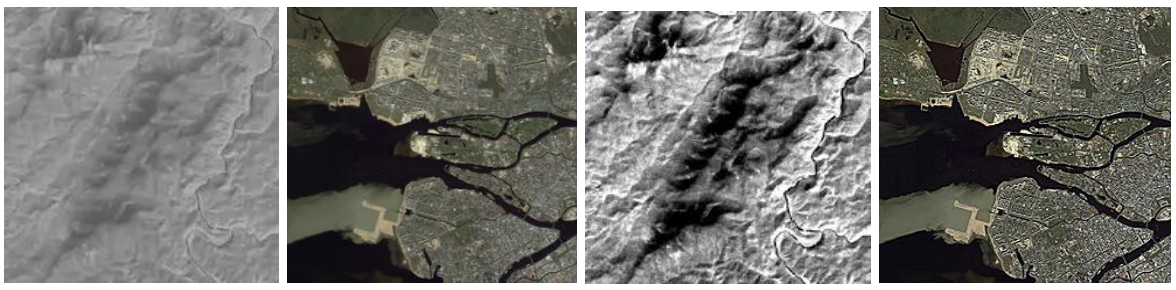
Залежно від властивостей зображень виділяють яскравісні перетворення чорно-білих (панхроматичних) і багатозональних знімків. У першому випадку застосовуються такі методи, як гістограмні перетворення, різні методи фільтрації, усунення шумів, підкреслення контурів, квантування і кольорокодування.

До яскравісних перетворень багатозональних знімків відносяться: синтез кольорового зображення, математичні операції з матрицями значень яскравості пікселів, метод головних компонент.

Контраст зображення – це різниця між максимальним і мінімальним значеннями яскравості.

Контрастування виконується шляхом перетворення гістограми зображення, яка характеризує розподіл яскравостей на знімку і показує, скільки пікселів зображення припадає на кожні з 256 рівнів яскравості. Відомі 2 підходи до вирішення завдання контрастування зображення: перший полягає в розтягуванні гістограми (лінійне і нормалізація), другий – у перерозподілі значень яскравості (вирівнювання гістограми).

Слабкий контраст (рис. 16.8, *а*) – найбільш поширений дефект фотографічних, сканерних і телевізійних зображень, зумовлений обмеженістю діапазону відтворених яскравостей. Шляхом цифрової обробки контраст можна підвищити, змінюючи яскравість кожного елемента зображення і збільшуючи діапазон яскравостей (рис. 16.8, *б*).



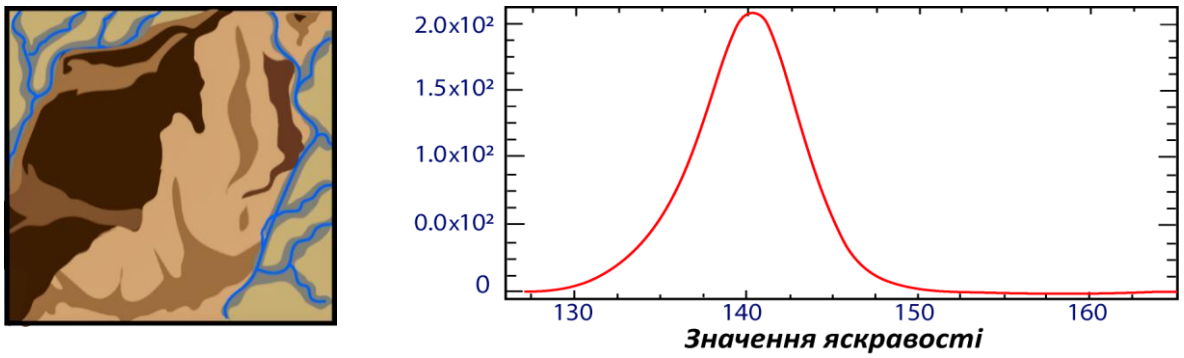
а) *б)*

Рис. 16.8. *Корегування слабкого контрасту:*
а) неконтрастне зображення; б) контрастне зображення

Операція підвищення контрастності знімка може бути використана при візуальному дешифруванні знімків (наприклад, щоб підкреслити межі об'єктів). Існує декілька методів підвищення контрасту шляхом цифрової обробки [36]:

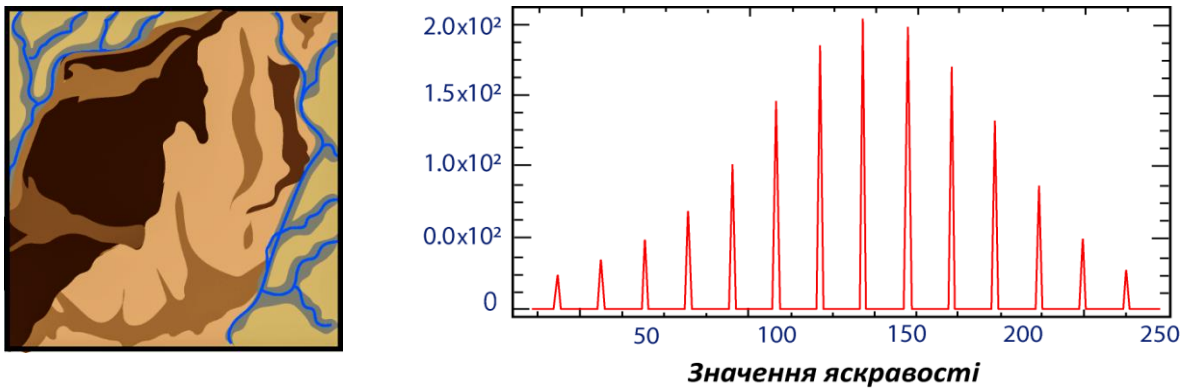
– *лінійне розтягування гістограми* полягає в розтягуванні існуючого на знімку інтервалу яскравостей і наступного перерахування значень яскравості. Всім значенням яскравості надаються нові значення з метою охопити весь можливий інтервал зміни яскравості (0,255) (рис. 16.9, 16.10);

– *нормалізація гістограми*. На весь можливий інтервал зміни яскравості розтягується не вся гістограма, а її найбільш інтенсивна ділянка (рис. 16.11).



а) *б)*

Рис. 16.9. *Лінійне розтягування гістограми: а) вихідний знімок; б) діапазон значень яскравості від 126 до 165, середнє = 140*

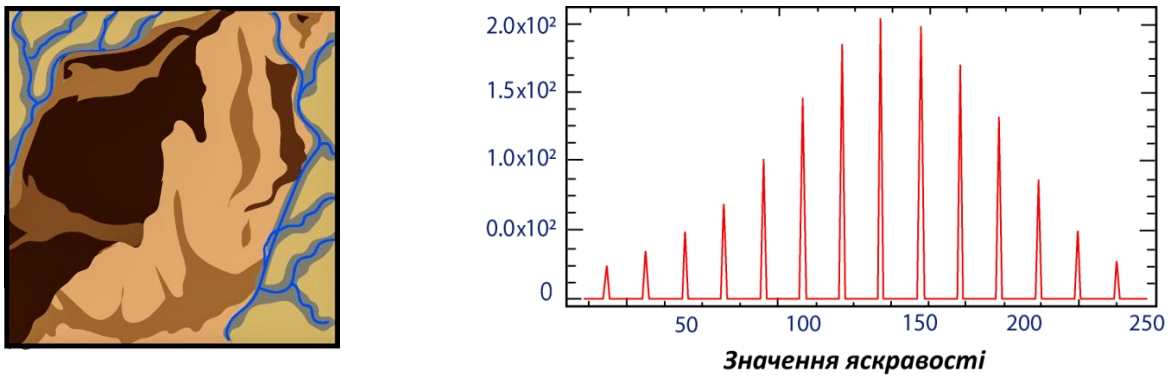


а) *б)*

Рис. 16.10. *Лінійне розтягування гістограми: а) знімок після лінійного розтягування гістограми; б) діапазон значень яскравості від 0 до 255, середнє = 156,7*

У процесі вирівнювання значення яскравості пікселів змінюються таким чином, щоб для кожного рівня яскравості була однакова або близька кількість пікселів, тобто відбувається згладжування зображення.

Якщо основними об'єктами для аналізу виступають площинні об'єкти, актуальним є пригнічення шуму, тобто усунення дрібних деталей, що являють собою різкі локальні стрибки яскравості. Для вирішення цієї проблеми використовуються методи фільтрації.



а) *б)*

Рис. 16.11. *Нормалізація гістограми: а) знімок після вирівнювання гістограми; б) діапазон значень яскравості від 0 до 255, середнє =115,9*

Фільтрація – це перетворення, яке дозволяє підсилити відтворення тих або інших об'єктів, зменшити небажане вуалювання, усунути інші випадкові завади (шум).

Фільтрація зображення застосовується для покращення його якості, зняття шуму і виділення об'єктів, що цікавлять дослідника.

Згладжувальні (низькочастотні фільтри) дозволяють зняти шум і прибрати дрібні деталі, що веде до отримання більш однорідних ділянок зображення, придатних для подальшої обробки з метою виявлення тих або інших об'єктів. До них відносяться усереднювальний і медіанний фільтри та перетворення в ковзному вікні. Принцип їх дії полягає в перетворенні значень яскравості для кожної точки зображення на основі інформації про яскравість її сусідів на невеликій відстані.

Один з найпростіших способів фільтрації – перетворення в ковзному вікні. При такому перетворенні перераховуються значення яскравості всіх пікселів зображення. Перерахунок здійснюється для кожного пікселя наступним чином. Коли даний піксель стає центральним у вікні, що "рухається" по знімку, йому дається нове значення, яке є функцією від значень пікселів, що його оточують (рис. 16.12) [35].

Високочастотні фільтри призначені для виділення або підкреслення перепадів значень пікселів, що використовується при пошуку на зображенні меж об'єктів і виявлення різних структур, які проявляються як зсув або стрибок значень елементів зображення.

Квантування найчастіше використовують у випадках невизначених меж, плавних переходів. При квантуванні відбувається групування яскравості в декілька досить великих рівнів. У результаті такого перетворення утворюється нове зображення, де дрібні деталі, що "*зашумлюють*" знімок, зникають, а поступова зміна яскравості замінюється чіткою межею і більшою виразністю в розподілі яскравостей [35].

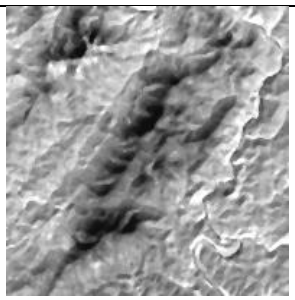
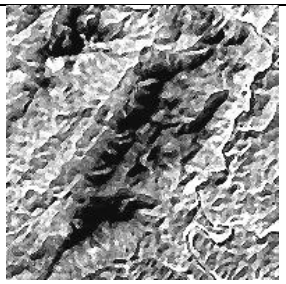
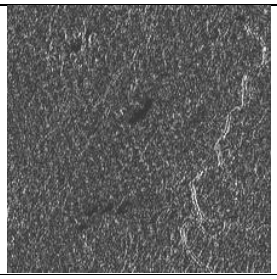
0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1	Якщо вагові коефіцієнти усіх пікселів у вікні однакові, зображення буде згладженим.	
-1 -1 -1 -1 3 -1 -1 -1 -1	Якщо ваговий коефіцієнт центрального пікселя у вікні значно вищий від інших, то зображення стане більш різким	
-1 3 -1 -1 3 -1 -1 3 -1	Якщо вагові коефіцієнти вертикально розташованих пікселів у вікні будуть значно вищі від інших, на зображенні виділяться лінії меридіонального напрямку.	

Рис. 16.12. *Перетворення у ковзному вікні*

Питання для самоконтролю

1. *Обґрунтуйте необхідність наземної обробки космічних даних.*
2. *Назвіть основні операції наземної обробки даних супутникової зйомки.*
3. *Охарактеризуйте рівні наземної обробки даних супутникової зйомки.*
4. *Охарактеризуйте етап попередньої обробки даних.*
5. *В чому сутність етапу нормалізації даних?*

XVII. КОРЕГУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВИКРИВЛЕНЬ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ

Геометричне (просторове) спотворення супутникового знімка – це неоднаковість відтворення геометричних характеристик об'єкта зондування на зображенні.

Метою геометричних перетворень є подання супутникового знімка в певній проєкції та системі координат.

17.1. Причини появи геометричних викривлень супутникових знімків

Геометричні викривлення на супутникових знімках виникають через поєднання низки факторів, пов'язаних з особливостями отримання та обробки даних. Основні причини включають:

– ***форма Землі*** (Земля не є ідеальною кулею, а має форму геоїда, що відрізняється від еліпсоїда обертання, що призводить до спотворень при проєкції тривимірної поверхні Землі на двовимірну площину карти);

– ***проєкція карти*** (невідповідність формату зображення тій чи іншій картографічній проєкції). Об'єкти на карті пов'язані з реальними об'єктами на місцевості за допомогою просторових координат. Місце розташування об'єктів на поверхні Землі визначається за допомогою географічних координат: широти і довготи, які добре підходять для визначення місця розташування об'єкта. Проте вони не придатні для визначення його просторових характеристик, таких як довжина, площа тощо. Для подолання цих труднощів дані переводять із сферичних географічних координат у прямокутні спроєктовані координати. Картографічна проєкція – математично визначений спосіб відображення поверхні еліпсоїда на площині. Сутність проєкцій полягає в тому, щоб фігуру Землі – еліпсоїд, який неможливо розгорнути на площину, замінити іншою фігурою, що розгортається на площині або безпосередньо площиною (конічна, циліндрична або азимутальна проєкції). За характером викривлень, що вносяться у зміст карти після її проєктування, проєкції поділяються:

– на рівноплощинні (рівновеликі) – відсутні викривлення площ;

– рівнокутні – відсутні викривлення кутів і, отже, форми об'єктів;

– рівнопроміжні – відсутні викривлення довжин, відстані залишаються незмінними у певних напрямках.

Існують також проєкції, в яких викривлення мінімізовані відразу за двома або трьома показниками (кути, довжини, площі). Проекцій, у яких би масштаб довжин був однаковий в усіх напрямках, не існує.

Доволі широко поширені групи проєкцій UTM (Universal Transverse Mercator) і Гаусса-Крюгера, які базуються на поперечній циліндричній проєкції Меркатора (Transverse Mercator), однак мають різні номенклатуру та параметри. Отже, для

встановлення відповідності між елементами зображення і геодезичною координатною сіткою потрібно проводити процедуру геометричної корекції зображення [21]:

– ***висота орбіти супутника*** (висота розташування супутника впливає на кут падіння променів на поверхню Землі, що може призвести до викривлень, особливо на краях знімка);

– ***орбітальні характеристики супутника*** (неточне знання орбіти супутника, зміни в атмосфері (наприклад, рефракція світла), а також атмосферні умови в момент зйомки (хмарність, туман) можуть впливати на якість знімків);

– ***оптичні спотворення*** (неточне калібрування оптичної системи супутника, а також геометричні особливості самої камери можуть створювати спотворення, які необхідно враховувати);

– ***помилки у вимірюваннях*** (неточні вимірювання положення супутника на орбіті, а також параметрів його камери, які зазвичай спричиняють геометричні спотворення);

– ***обертання Землі*** (обертання Землі під час зйомки може викликати зсув об'єктів на зображенні, особливо для довгих експозицій);

– ***у зв'язку з тим, що супутникові спостереження ведуться зазвичай під кутом до надиру***, то виникають специфічні викривлення при використанні сканерів із лінійною розгорткою та радіолокаційних станцій бокового огляду;

– ***датчик, встановлений на космічному носієві, формує зображення, сторони якого орієнтовані вздовж і впоперек лінії шляху носія***, яка зазвичай, не збігається з напрямками північ – південь або захід – схід, що потребує повертати одержаний кадр [69];

– ***через пересічений рельєф місцевості, нестабільність траєкторії літального апарату*** тощо.

Крім вищеперерахованих причин викривлень, додаткові викривлення також може вносити оптико-електронний сенсор. Унаслідок того, що камера має лінзу обмеженого розміру і непостійної товщини, на її краях виникають більші викривлення, ніж у центрі. Спостерігається явище *дисторсії (від лат. distorsio* – викривлення) оптичних систем.

Дисторсія – аберація оптичних систем, при якій лінійне збільшення змінюється по полю зору. При цьому порушується подібність між об'єктом і його зображенням.

У цьому разі прямі лінії зображуються кривими, крім тих, які лежать в одній площині з оптичною віссю. Наприклад, зображення квадрата, центр якого перетинає оптична вісь, може виглядати різним чином [21]. Воно має вигляд подушки (подушкоподібна дисторсія) при додатній дисторсії і вид бочки (бочкоподібна дисторсія) – при від'ємній (рис. 17.1).

Існують й інші види викривлень, зокрема більш складні викривлення форми.

Геометрична корекція дозволяє розв'язати відразу кілька задач.

По-перше, в результаті корекції усуваються або принаймні зменшуються геометричні викривлення.

По-друге, при геокорекції виконується процес проєктування знімка на площину відповідно до заданої картографічної проєкції (або процес перепроєктування знімка з вихідної проєкції в необхідну), тобто відбувається прив'язка зображення.

По-третє, оскільки всі картографічні проєкції пов’язані з картографічними координатами (широта і довгота), то процедура трансформування включає в себе і географічну прив’язку [21].

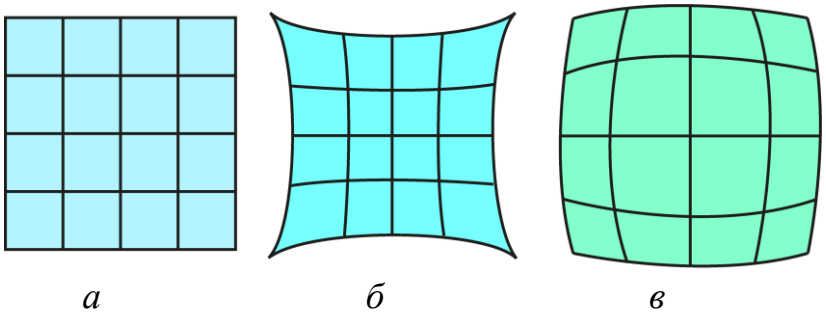


***Рис. 17.1**. Зображення оптико-електронного сенсора:
а) ідеальне (правильне) зображення; б) дисторсія типу "подушка";,
в) дисторсія типу "бочка"*

17.2. Методи корекції геометричних викривлень

17.2.1. Класифікація методів корекції

Методи геометричної корекції викривлень поділяються (рис. 17.2) на строгі, апроксимаційні (для них необхідні параметри датчика, поверхні і/або опорні точки) і параметричні(тільки опорні точки).

Найточнішим підходом до геометрично обробки знімків є моделювання процесу зйомки (так звана *строга модель*), в результаті якого відновлюється просторове положення променя (для зйомки в центральній проєкції) або сукупності променів (для сканерної зйомки), що сформували знімок. Цей метод передбачає визначення траєкторії носія (сенсора), його зовнішню орієнтацію, а також використання геометричної моделі сенсора (елементів внутрішнього орієнтування) [121].

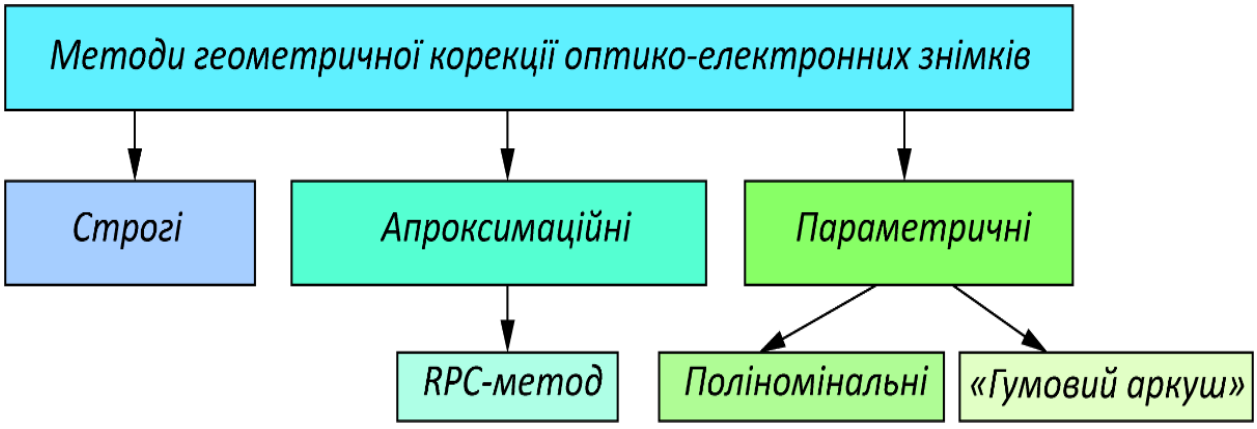


***Рис. 17.2.** Класифікація методів геометричної
корекції викривлень МДЗ [21]*

Застосування строгої моделі зручно для роботи з аерофотознімками. Для супутникових знімків зазвичай строга геометрична модель сенсора не є загальнодоступною, тому її альтернативою виступає апроксимаційна модель раціональних функцій ("RPC-метод", "метод RPC-коефіцієнтів"), яка полягає у використанні для зв'язку елементів кадра і елементарних ділянок земної поверхні дробо-раціональних функцій виду [21]:

$$x_N = \frac{P_1(\tilde{\varphi}_N,\tilde{\lambda}_N,\tilde{h}_N)}{P_2(\tilde{\varphi}_N,\tilde{\lambda}_N,\tilde{h}_N)}, y_N = \frac{P_3(\tilde{\varphi}_N,\tilde{\lambda}_N,\tilde{h}_N)}{P_4(\tilde{\varphi}_N,\tilde{\lambda}_N,\tilde{h}_N)}, \quad (17.1)$$

де в чисельниках і знаменниках стоять поліноми третього ступеня:

$$P_q 1(\tilde{\varphi}_N, \tilde{\lambda}_N, \tilde{h}_N) = \sum_{i=0}^{3} \sum_{j=0}^{3} \sum_{k=0}^{3} a_{ijkq} \tilde{\varphi}_N^i \widetilde{\varphi\lambda}_N^j \tilde{h}_N^k, \quad (17.2)$$

де q =1…4, $i+j+k \leq 3$.

Співвідношення пов'язують нормовані геодезичні координати $\tilde{\varphi}_N$, $\tilde{\lambda}_N$, $\tilde{h}_N$ (широту довготу і висоту відповідно), точки місцевості N з "піксельними" координатами x_N, y_N – її відображеннями на знімку.

Нормування здійснюється таким чином, щоб обчислені значення $\tilde{\varphi}_N$, $\tilde{\lambda}_N$, $\tilde{h}_N$ знаходились в інтервалі 0 … 1. Коефіцієнти a_{ijkq} (усього 80 коефіцієнтів – по 20 на кожний поліном) обчислюють постачальники даних, які мають можливість використовувати строгу модель камери.

Коефіцієнти обчислюються для кожної сцени, що постачається (якщо договір на поставку даних передбачає передачу замовнику коефіцієнтів RPC-моделі) [5], а їх використання при трансформуванні знімків земної поверхні передбачено практично всіма сучасними пакетами обробки даних ДЗЗ.

За відсутності інформації про знімальну систему і параметри її руху використовуються *універсальні* (*параметричні*) *методи*, засновані на найбільш загальних уявленнях про геометрію зйомки.

Універсальні методи використовують співвідношення, що описують зв'язок між координатами опорних точок об'єктів, розрізнених на знімку, і геодезичними координатами цих же об'єктів (або геометрично правильним зображенням у необхідній проєкції). Трансформування зображення і його просторова прив'язка з використанням параметричних методів (на основі лінійних, нелінійних перетворень або перетворення "гумовий аркуш") є найбільш доступними для споживача, хоча їх показники точності вихідних продуктів у більшості випадків значно менші, ніж при застосуванні строгого або апроксимаційного підходу.

Процес трансформування у цьому разі складається з таких етапів [21]:

– визначення місця знаходження опорних точок;

– обчислення коефіцієнтів і перевірка перетворення;

– створення вихідного зображення, що містить нові координати (при цьому пікселі повинні бути перераховані відповідно до з нової сітки координат).

17.2.2. Вибір опорних точок для геометричних викривлень

Операцію виправлення геометричних спотворень виконують за допомогою опорних точок (які пов'язані з будь-якими об'єктами, координати яких відомі). Для отримання координат опорних точок можна використовувати топографічні карти або глобальну систему позиціювання (GPS). Вибір опорних точок для геометричних перетворень є ключовим етапом, який визначає, як об'єкт буде перетворено. Щоб геометричне перетворення супутникового знімка було виконане з мінімальною похибкою, опорні точки повинні потрапляти на добре розрізнюванні як на вихідному зображенні, так і на карті статичні об'єкти (такі як перетинання доріг, злітно-посадкові смуги, основи веж, будівель тощо). Крім того, опорні точки потрібно розташовувати якомога більш рівномірно по всьому знімку [105].

Чим більше точок, тим точніше прив'язування та трансформування зображення.

Крім загальних вимог, що висуваються до опорних точок, слід враховувати низку специфічних моментів. Супутникові знімки можуть мати великий кут нахилу, причому його напрямок заздалегідь невідомий, тому точки повинні розташовуватись на відкритих місцях. Між моментом зйомки і визначенням координат опорних точок може минути багато часу, потрібно, щоб точки збереглись і гарно розпізнавались у різний час року.

17.2.3. Перетворення координат

Перетворення координат зображення відбувається на основі обраної геометричної моделі: афінне перетворення, метод гумового аркуша, поліноміальна трансформація.

Афінне перетворення – основний вид лінійних перетворень, таких як зсув, поворот, дзеркальне відображення. Застосовують для перетворення невеликих ділянок зображення і може бути корисним перед вибором контрольних точок. Афінні перетворення виконують поліномами першого порядку.

При застосуванні *методу гумового аркуша* задані опорні точки зображення є фіксованими і не змінюють свої координати у процесі трансформування. Положення інших точок розраховується на основі інтерполяції координат.

При невизначених властивостях зображення їх геометричне трансформування здійснюється за допомогою поліномів перетворення [24].

Метод поліноміального перетворення засновано на обрахунку трансформаційної матриці коефіцієнтів, які використовуються для апроксимації координат опорних точок поліномами різних порядків і визначення положення всіх точок зображення. Основна мета поліноміального перетворення полягає у визначенні такого апроксимуючого полінома, який би забезпечив найменше відхилення координат опорних точок зображення від заданих. Для розв'язання задач трансформування використовуються поліноми різних порядків. Частіше використовують поліноми першого та другого порядків. Поліном третього порядку може бути застосований для значно спотворених зображень [24].

Залежно від викривлення, кількості наземних опорних точок та їх розташування відносно одна від одної, для точного перетворення можуть вимагатись доволі складні поліноміальні формули. Складність поліному виражається через его порядок.

Найпростішим видом параметричного перетворення є *лінійне перетворення*, або поліноміальне перетворення першого ступеня. Рівняння лінійного (афінного) перетворення записуються так:

$$x_0 = a_0 + a_1 x + a_2 y,$$

$$y_0 = b_0 + b_1 x + b_2 y. \qquad (17.5)$$

Для здійснення поліноміального перетворення першого ступеня слід знайти 6 коефіцієнтів – по три на у координату (*x* і *y*): a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2.

Лінійне перетворення може змінювати такі параметри (рис. 17.3):

– положення по *X* і/або *Y* – зміну положення, зміщення зображення на певну кількість пікселів по *X* і *Y*;

– масштаб по *X* і/або *Y* – коефіцієнти масштабування по *X* і*Y* можуть бути різними;

– нахил по *X* і/або *Y*;

– поворот – можна визначити будь-яке додатне або від'ємне число градусів для повороту за годинниковою стрілкою і проти неї відповідно. Поворот відбувається навколо центрального пікселя зображення;

– відображення – зліва направо, зверху вниз, зверху вниз і зліва направо (аналогічно повороту на 180 °).

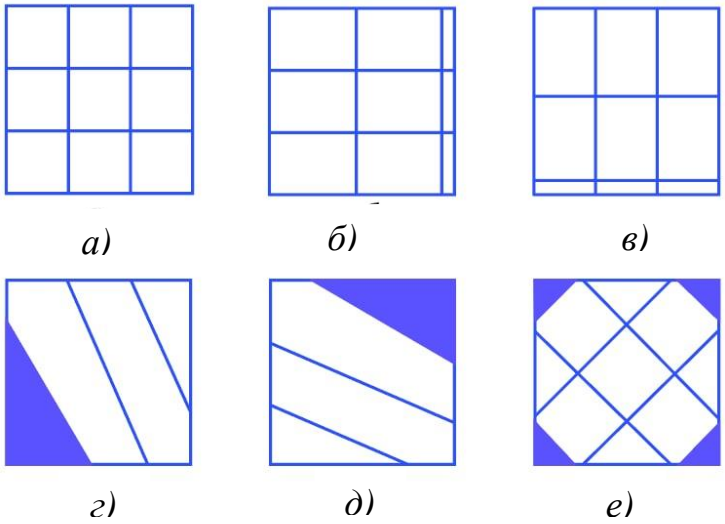


Рис. 17.3. *Приклади лінійних перетворень: а) вихідне зображення; б) зміна масштабу по X; в) зміна масштабу по Y; г) зміна перекосу по X; д) зміна перекосу по Y; е) поворот*

Прикладами застосування цього перетворення можуть бути: виправлення перекосів у даних ДЗЗ, поворот топографічних аркушів для надання їм правильної орієнтації.

Перетворення 1-го порядку також може бути використано для даних, які вже спроєктовані на площину. Наприклад, часто дані ДЗЗ вже знаходяться в локальній прямокутній системі координат, але не приведені до відповідної проєкції. Крім того, лінійне перетворення можна застосовувати для невеличких ділянок, коли кривизною поверхні можна знехтувати [21].

Нелінійні перетворення (поліноміальні 2-го і більш високого порядків) можуть корегувати нелінійні викривлення.

На рис. 17.4 зображено приклади результатів деяких нелінійних перетворень.

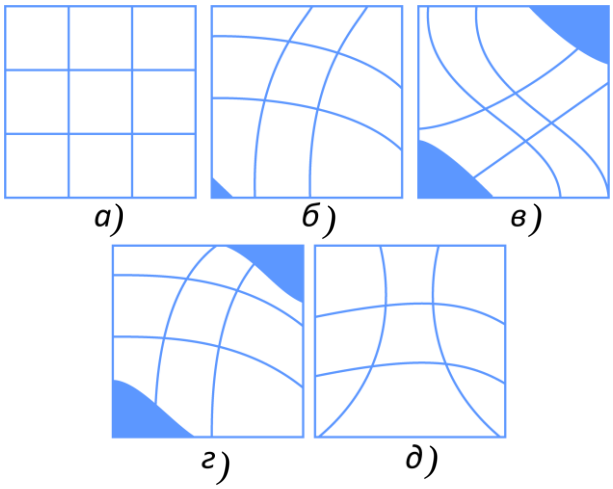


Рис. 17.4. *Приклади нелінійних перетворень: а) оригінал; б), в), г), д) можливі варіанти вихідного зображення при нелінійних перетвореннях*

Поліноміальні рівняння для перетворення порядку t виглядають так:

$$x_0 = \sum_{i=0}^{t}\sum_{j=0}^{i} a_k \times x^{i-j} \times y^j,$$

$$y_0 = \sum_{i=0}^{t}\sum_{j=0}^{i} a_k \times x^{i-j} \times y^j \qquad (17.4)$$

де t – порядок полінома, a_k і b_k – коефіцієнти поліномів, (x, y) – координати опорної точки на вихідному зображенні (вихідні координати), (x_0, y_0) – координати точки на карті або опорному зображенні (опорні координати), індекс k для a_k і b_k обчислюється за формулою:

$$k = \frac{i \times (i-1)}{2} + j.$$

Перетворення 2-го порядку зазвичай використовуються для трансформації даних з географічної системи координат (широта, довгота) в прямокутну, перетворення даних великих ділянок (з урахуванням кривизни Землі), точною прив’язкою викривлених зі тієї чи іншої причини даних (наприклад, через викривлення лінз камери) тощо.

Перетворення 3-го порядку використовуються для прив'язки викривлених аерофотознімків і радарних зображень.

Перетворення 4-го порядку можуть бути використані для дуже викривлених знімків.

При трансформуванні зображення методом кінцевих елементів, або *методом гумового аркуша*, воно розбивається на безліч трикутників (кожен з яких є кінцевим елементом), біля вершин яких знаходяться відомі опорні точки. Зазвичай використовується триангуляція Делоне [117]. Потім для кожного трикутника виконується корекція з використанням поліноміального перетворення. Оскільки розмір трикутника невеликий, то порядок перетворення незначний. Найчастіше використовується лінійне перетворення, яке є найпростішим і швидким. Дане перетворення не вимагає додаткової інформації, тому що в кожному трикутнику є три опорні точки [21].

Однак цей алгоритм має один недолік. Переходи між трикутниками виходять не завжди плавними. Для усунення цього недоліку при обробці в прикордонних зонах застосовують поліноми більш високих порядків.

Метод кінцевих елементів на основі трикутника використовується, коли інші методи трансформування не дозволяють досягти прийнятних результатів [60].

17.2.4. Ресемплінг

Ресемплінг – перевизначення яскравості пікселів у новій системі координат та створення нового файлу, зі збереженням яскравісної структури вихідного зображення.

Необхідність перевизначення яскравості пікселів у новій системі координат пов'язана з незбіганням сіток первинного зображення та еталонного, і як наслідок – розбіжності у розташуванні пікселів на трансформованому зображенні по відношенню до первинного. Тобто ділянки, рівні за площею (на місцевості), описуються різною кількістю пікселів на вихідному і трансформованому зображенні. Виникає ситуація, коли точка центру пікселя на вихідному зображені на трансформованому виникає на краю пікселя або на його межі, що ускладнює передавання яскравісних значень пікселів. Тобто слід здійснити повний перерахунок растру, оскільки сітка пікселів у вихідному зображенні в загальному випадку не відповідає сітці опорного зображення. І як наслідок, слід відповідно до певного алгоритму перерахувати яскравості пікселів вихідного зображення.

Принцип перерахунку растру ілюструє рис. 17.5, *а*, де показано вихідне абстрактне зображення з розставленими по кутах опорними точками, яким відповідають точки на опорному зображенні (рис. 17.5, *б*). Для порівняння сітки пікселів вихідного й опорного зображень виконаємо перетворення вихідного зображення таким чином, щоб опорні точки на обох сітках пікселів збігалися (рис. 17.5, *в*).

Використовуючи алгоритми перерахунку растру, значення пікселів вихідного зображення приводимо до пікселів вихідної сітки (рис. 17.5, *г*).

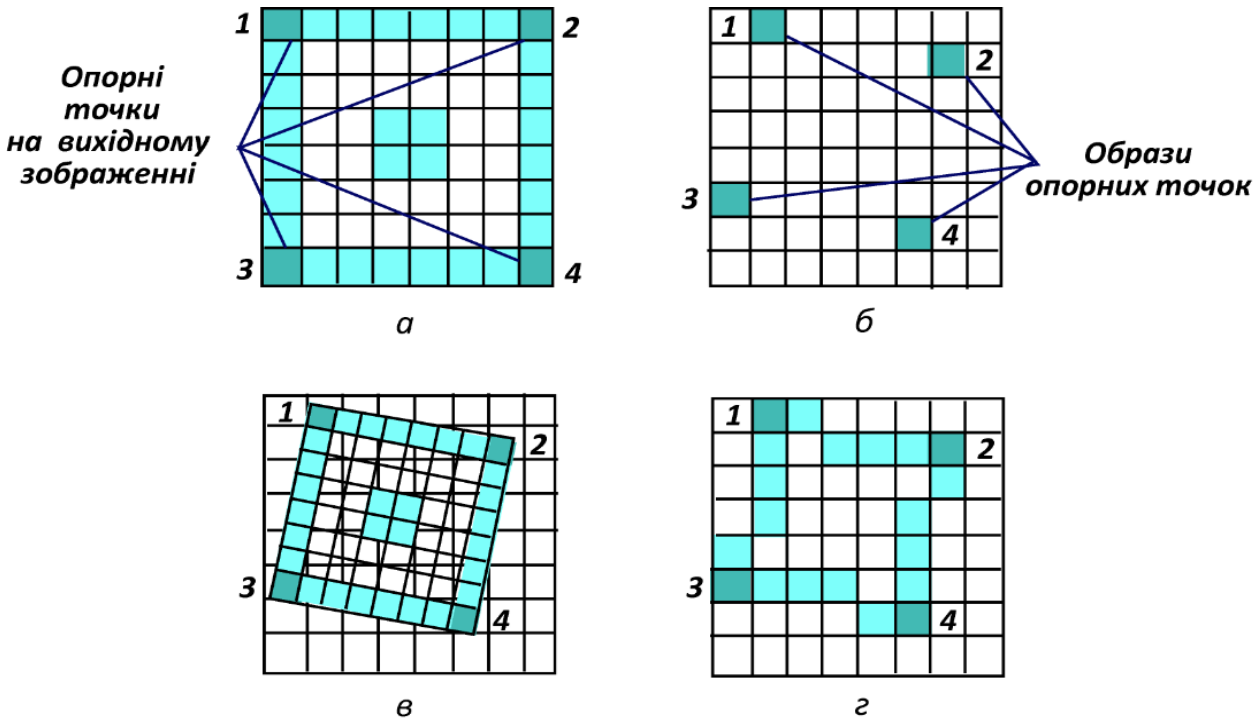


Рис. 17.5. *Принцип передискретизації*

Для надання відповідних значень яскравості трансформованим пікселям в програмах оброблення зображень застосовують наступні методи інтерполяції: метод найближчого сусіда; метод білінійної інтерполяції; метод кубічної інтерполяції [24].

Метод найближчого сусіда є найпростішим і найбільш швидким методом трансформування. При цьому піксель трансформованого зображення отримує значення найближчого до його ретрансформованих координат пікселя вихідного зображення

Похибка не перевищує половини розміру пікселя. Метод має низку переваг перед іншими методами, оскільки при його застосуванні передаються оригінальні значення пікселів без їх усереднення, тобто зберігаються первинні значення яскравості знімка, його екстремальні значення та слабо розрізнювальні значення яскравості. Метод підходить для трансформування тематичних растрових даних, у яких зображення в пікселях передає якісні характеристики. Однак слід обмежити застосування методу при перерахуванні значень із сітки координат більшого розміру в сітку координат меншого, через можливе зникнення пікселів або їх дублювання, виникнення розривів ліній [24]

Для визначення яскравості вихідного пікселя *алгоритмом найближчого сусіда* (рис. 17.6) обчислені в результаті трансформування координати пікселя (x_0, y_0) перетворюються до вихідної системи координат, використовуючи інверсію перетворення (тобто обернені рівняння).

Піксель, який є найближчим до повторно перетворених координат (x_r,y_r), є найближчий сусід. Значення яскравості цього пікселя стає значенням яскравості пікселя у вихідному зображенні.

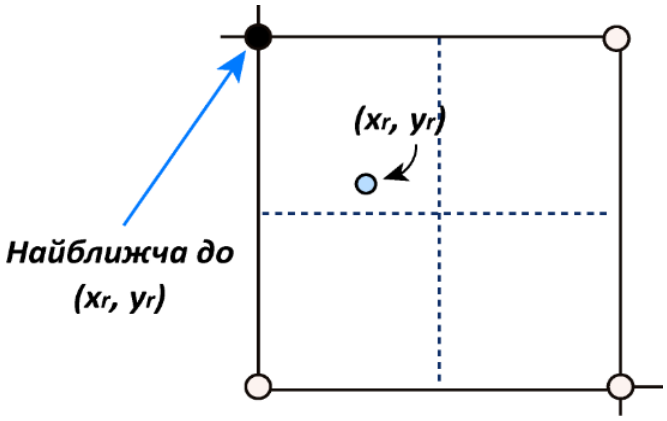


Рис. 17.6. *Передискретизація алгоритмом найближчого сусіда*

Перевага даного алгоритму полягає в тому, що він є найлегшим і найшвидшим; недоліки алгоритму – поява ефекту ступінчастості навколо діагональних і кривих ліній, а також дублювання/пропуск певної кількості пікселів вихідного зображення на перетвореному.

Метод білінійної інтерполяції передбачає використання значення чотирьох пікселів вихідного зображення (2×2), найбільш близьких до точки, що відповідає координатам пікселя трансформованого зображення, значення якого знаходять. При цьому розраховуються відстані між місцеположенням ретрансформованої координати пікселя і чотирма найближчими пікселями вихідного зображення. Перевага цього методу полягає в отриманні більш згладженого зображення в результаті трансформації, відсутності ефекту ступінчастості діагональних та кривих ліній, більша просторова точність. Метод білінійної інтерполяції використовують при суміщенні різномасштабних знімків, що отримані різними способами знімання. Також метод є ефективним при зміні розмірів пікселя, тобто при зміні розрізненності зображення [24]

У прикладі, наведеному на рис. 17.7, *б*, сусідні пікселі пронумеровані від 1 до 4. Враховуючи значення цих чотирьох пікселів, методом лінійної інтерполяції можна отримати значення яскравості V_r (рис. 17.7, *а*).

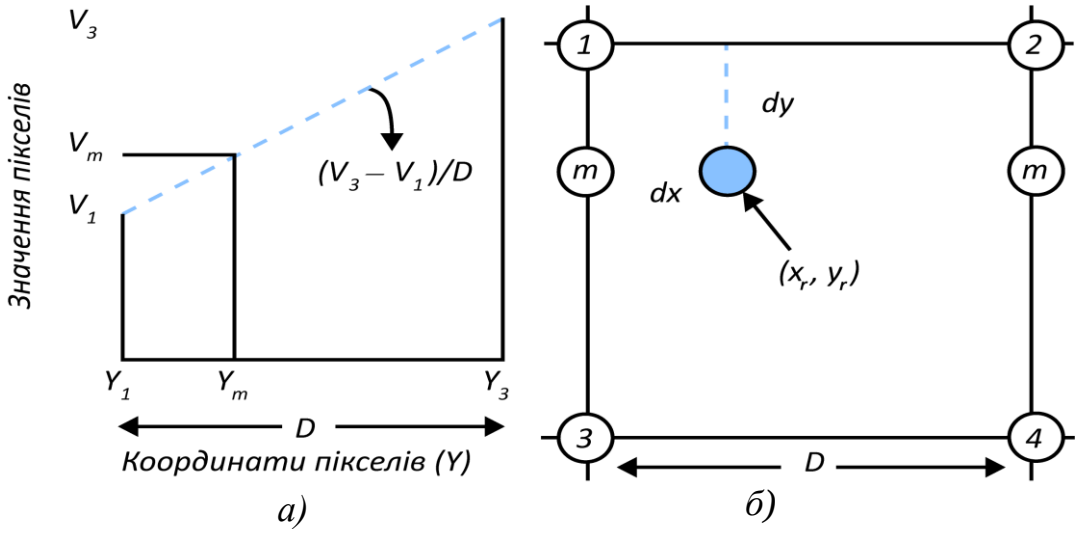


Рис. 17.7. *Лінійна (а) і білінійна (б) інтерполяція*

Наведемо вираз для обчислення V_r:

$$V_r = \frac{V_1(D-dx)(D-dy)+V_2 dx(D-dy)+V_3(D-dx)dy+V_4 dxdy}{D^2}, \quad (17.6)$$

де $V_1 \dots V_4$ – яскравості відповідних точок;
D – відстань між точками растру;
dx і dy – відстань між точкою V_r і V_1 по осі абсцис і ординат відповідно.

Таким чином, кожна з чотирьох точок має тим більшу вагу, чим ближче до неї точка r.

Метод кубічної інтерполяції (*кубічна згортка)* подібний до білінійної інтерполяції, за винятком того, що для визначення вихідної яскравості пікселя усереднений набір не з чотирьох, а з 16 пікселів (у масиві 4 × 4); до цих 16 вхідних значень яскравості застосована апроксимація кубічної, а не лінійної функції. При цьому середнє значення і стандартне відхилення значень пікселів вихідного і трансформованого зображення будуть меншими, ніж для інших методів, і зберігається чіткість зображення. Недоліки методу пов'язані зі складністю обрахунків і витратою більше часу на оброблення, а також значення деяких пікселів можуть значно змінитися [21].

Переваги алгоритму кубічної інтерполяції:

– у більшості випадків середнє і стандартне відхилення вихідних пікселів більш наближені до середнього і стандартного відхилень вхідних пікселів, ніж при будь-якому іншому алгоритмі передискретизації;

– ефект вагової кубічної кривої може і підвищити різкість зображення, і згладити шум [46].

Реальні ефекти залежать від використовуваних даних.

Істотним недоліком алгоритму є його велика обчислювальна ємність.

17.2.5. Ортотрансформування

Ортотрансформування – це перетворення знімка (центральної проєкції) на ортогональну проєк***цію, тобто на зображення у заданому масштабі, вільне від спотворення через кути нахилу знімка та з мінімальними (припустимими) спотвореннями через рельєф місцевості*** *(рис. 17.8).*

Даний процес є найбільш повним і найбільш точним підходом до геометричної корекції знімків. Зображення, одержане таким чином, називається ортозображенням, або ортофотопланом. Масштаб у межах такого зображення постійний у всіх напрямках, а дисторсії не перевищують дозволених меж. Завдяки цьому ортофотоплан може бути використаний для проведення точних геодезичних вимірів і виготовлення топографічних карт, масштаби яких дрібніші від масштабу самого ортофотоплана.

Цифрові моделі рельєфу, наявність яких у багатьох випадках є нагальною при ортотрансформуванні, як правило, є регулярною геодезичною координатною сіткою (GRID), для кожного вузла якої задане значення висоти $h_{i,j}$, що відповідає

висоті рельєфу земної поверхні в даній точці, виміряної відносно земного еліпсоїда [21].

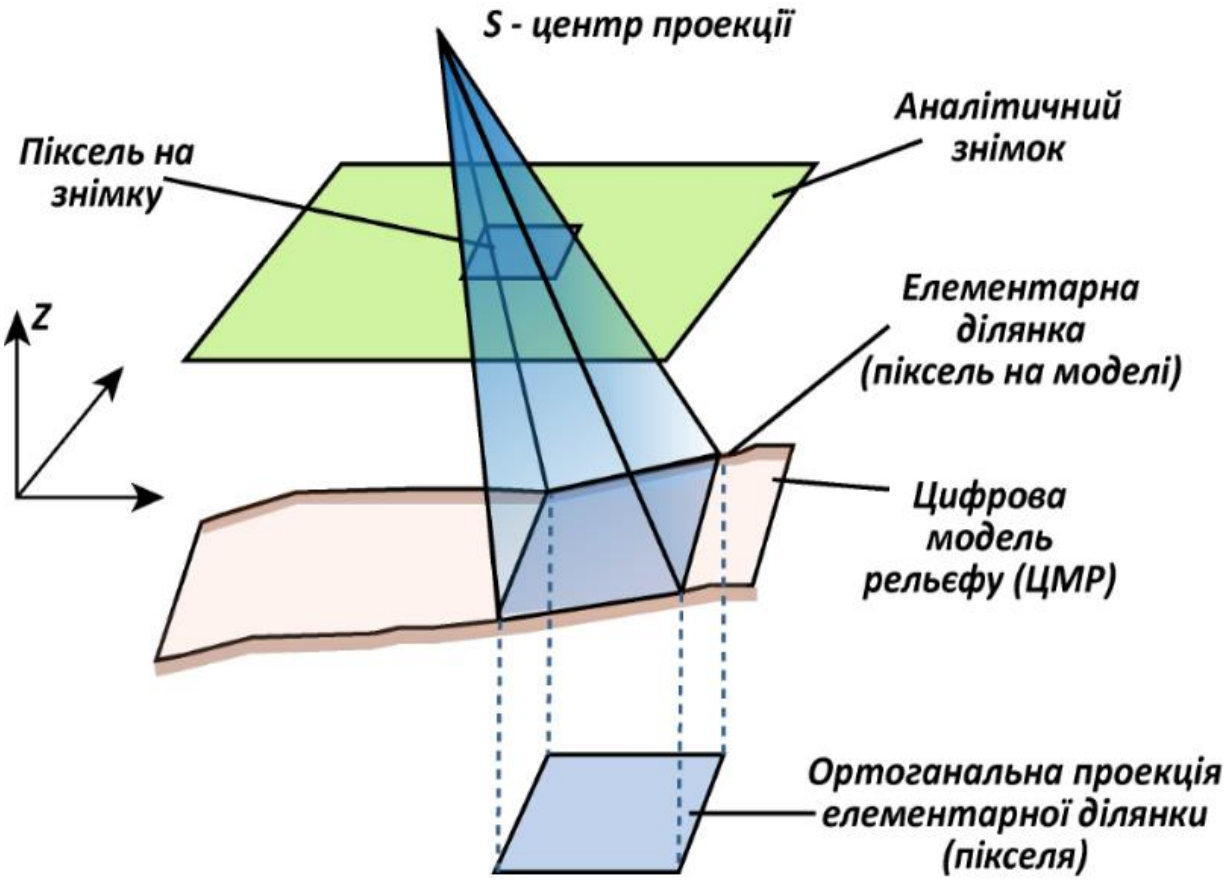


Рис. 17.8. *Графічна інтерпретація ортофототрансформування*

Перевагами моделі з регулярною сіткою є її простота і зручність використання, основним недоліком – загалом неефективне розташування точок (не на всіх ділянках потрібна однакова щільність сітки). Регулярні моделі знаходять застосування у тих випадках, коли потрібна підвищена точність зйомки, наприклад, у проєктуванні аеродромів. В нерегулярних цифрових моделях точки можуть розташовуватись будь-як, але із заданою щільністю, яка забезпечує точність рельєфу на даній ділянці не нижче від заданої. Зв’язування точок у єдину модель здійснюється за допомогою методів триангуляції, найбільш відомою з яких на сьогодні є триангуляція Делоне.

Викривлення через рельєф місцевості при ортотрансформуванні виправляються за рахунок того, що кожному елементу цифрової моделі рельєфу знаходиться еквівалентне положення на знімку. Значення яскравості для цього місця розташування визначається на підставі передискретизації значень найближчих пікселів на основі вищеописаних алгоритмів [21].

Варто зазначити, що навіть при роботі з даними супутникової зйомки високого розрізнення використання ЦМР вимагається не завжди. В місцевостях, де рельєф слабо змінюється при малих відхиленнях камери від надирного напрямку

рельєф часто не використовується або використовується рельєф набагато нижчої точності, ніж потрібно для створення ортофотоплану заданого масштабу. Критерієм, за яким можна судити про необхідність використання ЦМР, може бути такий [21]:

$$\Delta h \Delta h_{max} \cdot tg\theta tg\theta_{max} < \delta l,$$

де Δh_{max} – максимальний розмах змін рельєфу в межах кадра;
θ_{max} – максимальний в межах кадра кут зйомки (рис. 17.9);
δl – просторове розрізнення знімка.

Так, наприклад, для знімка, знятого в надир із супутника IKONOS (висота орбіти 681 км, поперечний розмір кадра 10 км, звідки θ_{max}=10/681/2≈0,0073, просторове розрізнення δl=1 м), перепади рельєфу в його межах, що не перевищує ~160 м, цифрову модель рельєфу використовувати необов'язково, оскільки викривлення, викликані рельєфом, не перевищують розмірів елемента розрізнення. Для аналогічного знімка, знятого під кутом 20° від надира, величина припустимого розмаху значень рельєфу впаде приблизно до 2,5 м.

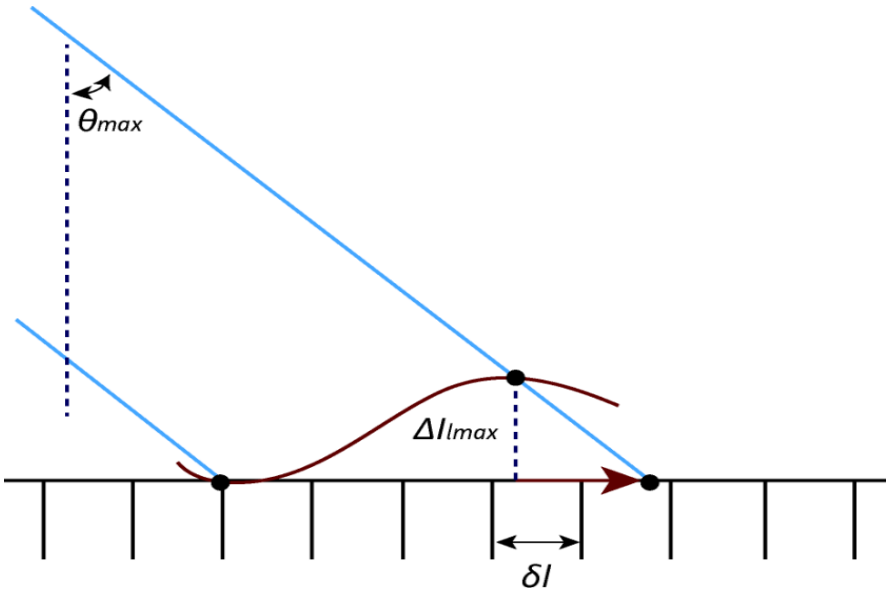


Рис. 17.9. *Зміщення позначки від елемента поверхні при оптичній зйомці*

На першому етапі створення ортофотопланів проводяться підготовчі роботи, що включають в себе перетворення (якщо потрібне) вихідних даних із спеціалізованих і архівних форматів у формати використовуваного програмного забезпечення, збір і аналіз наявних картографічних матеріалів місцевості, на яку будується ортофотоплан, з наступним висновком про необхідність використання цифрової моделі рельєфу. Якщо цифрова модель рельєфу потрібна, то слід забезпечити її наявність [21].

На сьогодні існують загальнодоступні або умовно доступні глобальні цифрові моделі місцевості відносно невисокого розрізнення (90–100 м): SRTM,

GTOPO30 та інші, які можна використовувати при проведенні робіт, що не потребують високої точності. Більш точні моделі рельєфу для конкретної території одержують за допомогою цифрових топографічних карт або растрових копій звичайних карт. Ще одним часто використовуваним способом одержання рельєфу є проведення не звичайної, а стереоскопічної зйомки.

Наступним кроком при проведенні робіт з ортотрансформування є внутрішнє і зовнішнє орієнтування знімків.

Для аерофотозйомки цей процес потребує введення й автоматизованого розрахунку значної кількості параметрів, що описують внутрішню структуру і положення знімальної апаратури та земної поверхні в момент зйомки. Для супутникової зйомки в оптичному діапазоні внутрішнє і зовнішнє орієнтування найчастіше проводиться за допомогою метода раціональних функцій на основі метаданих знімка, що включають значення RPC-коефіцієнтів. У цьому разі воно, як правило, не потребує спеціальних дій з боку користувача.

На етапі *планово-висотної підготовки* виконується розстановка опорних і контрольних точок з урахуванням наступних рекомендацій [99]:

– опорними потрібно обирати чіткі точки, що однозначно розпізнаються на зображенні, значення планових координат яких одержані з точністю не гірше 0,1 мм у масштабі створюваного ортофотоплану, точність абсолютних висот – 30 % від висоти перетину рельєфу. Точність абсолютних висот опорних точок повинна забезпечити урахування викривлень через рельєф місцевості. Джерелами опорних точок можуть слугувати топокарти більшого ніж створюваний ортофотоплан, масштабу, матеріали аналітичної фототриангуляції аерофотознімків, геодезичні супутникові виміри тощо;

– кількість обраних опорних точок для побудови геометричної моделі місцевості в межах площі сцени залежить від методу фотограмметричної обробки. Так, для методу RPC-коефіцієнтів використовується, як правило, 5 опорних точок, по можливості ці опарні точки повинні знаходитись в кутах і центрі знімка, що дозволить найбільш точно визначити параметри орієнтування сцени. Застосування строгої моделі дозволяє використовувати і меншу кількість опорних точок. Для знімків IKONOS при використанні строгої моделі камери часто достатньо всього однієї опорної точки (для усунення систематичного зсуву); для знімків усіх інших систем бажано використовувати більшу кількість точок. При обробці параметричним способом (тільки за опорними точками) кількість точок повинна бути достатньо великою (кілька десятків на кадр), при цьому точність отриманого ортофотоплану все-таки виявляється нижче, ніж при використанні моделі камери.

Незалежно від використовуваного методу ортотрансформування, крім опорних точок встановлюються також і контрольні точки. Їх координати не беруть участь у розрахунках елементів моделей або формул перетворення, однак за ними в майбутньому можна оцінити коректність ортотрансформування.

На етапі власне ортотрансформування формується нове зображення в ортогональній проєкції. Перерахунок елементів растра здійснюється за допомогою одного із попередньо вказаних методів. Приклад вікна налаштування

параметрів ортотрансформування космічного знімка IKONOS за методом RPC-коефіцієнтів без вказівки наземних опорних точок у ПК ENVI наведено на рис. 17.10.

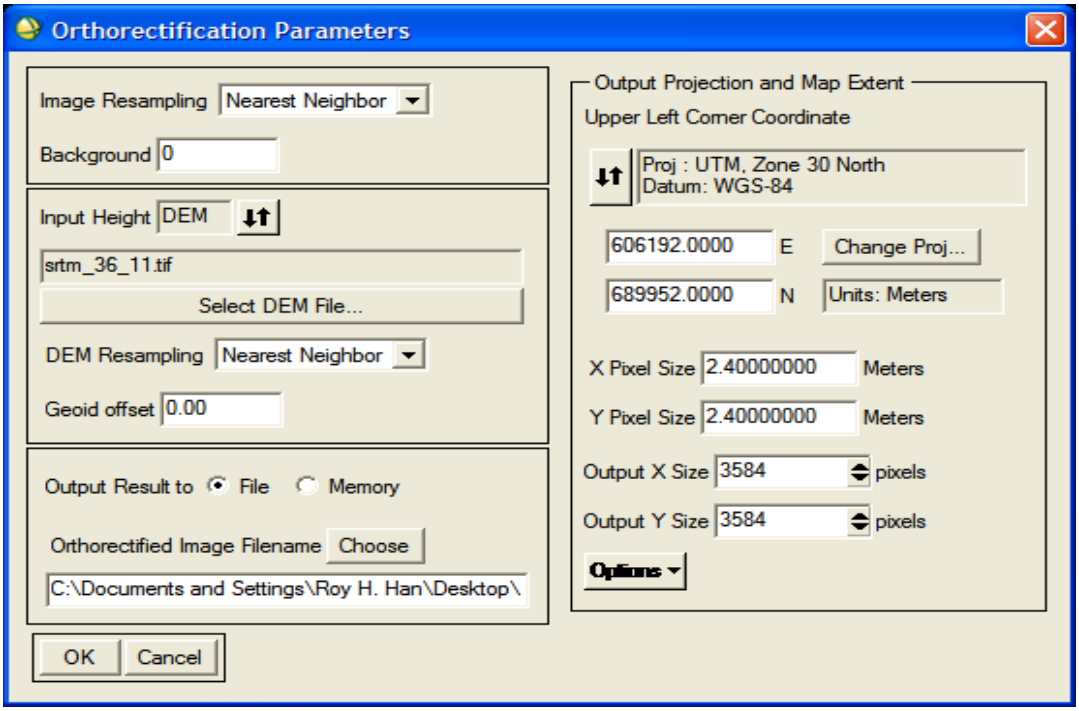


Рис. 17.10. *Вікно ПК ENVI для налаштування параметрів ортотрансформування знімків IKONOS на основі методу RPC-коефіцієнтів без використання наземних опорних точок*

Для сформованого ортофотоплану потрібно провести оцінку точності.

Контроль планового положення опорних і контрольних точок виконується за різницями планових координат зображень цих точок на ортофотоплані та їх істинними значеннями з каталогу з використанням таких співвідношень:

– похибка планового положення по горизонталі;

– похибка планового положення по вертикалі;

– похибка планового положення.

На кожну опорну і контрольну точку виконується ретельне наведення з наступною її реєстрацією. Відповідно до прийнятих інструкцій із проведення фотограмметричних робіт [99] величини похибок у плановому положенні опорних точок не повинні перевищувати 0,2 мм у масштабі карти, контрольних – 0,3 мм. Для 10 % опорних точок допускається розходження в 0,4 мм в масштабі карти, для 10 % контрольних точок – 0,6 мм в масштабі карти.

Ортотрансформування РЛЗ має свої особливості. По-перше, характер зміщень елементів рельєфу на РЛЗ відрізняється від того, що має місце в зйомці оптичного діапазону, тому їх обробка повинна здійснюватися спеціалізованими програмними пакетами або спеціалізованими функціями.

Так, для пакету ENVI потужні функції з ортотрансформування РЛЗ з урахуванням рельєфу закладені в розширені SARscape, яке призначене, в першу чергу, для інтерферометричної обробки радіолокаційних зображень, результатом якої є ЦМР, і часто одержану модель можна використовувати для ортотрансформування вихідних зображень.

Можливостями з ортотрансформування радіолокаційних зображень володіють також пакети PHOTOMOD RADAR і додаток InSAR до ERDAS Imagine [17].

Визначення положень опорних і контрольних точок на РЛЗ має деякі особливості:

– спекл-шум, притаманний радіолокаційним зображенням, ускладнює виявлення будь-яких об'єктів, які обираються як опорні точки;

– зображення об'єктів, що рухаються, завжди зсунуті відносно їх реального положення в азимутальному напрямку на відстань, пропорційну швидкості руху об'єкта. Даний ефект може призводити до помилкового виявлення опорних точок, встановлених точкових і лінійних об'єктів;

– різкі зміни рельєфу призводять до викривлень, не характерних для оптичної зйомки. Зокрема, вершини гірських хребтів зсуваються в напрямку зйомки на відстань, пропорційну їх висоті (ефект укорочення – *foreshortening*).

Аналогічно високі будівлі виглядають суттєво нахиленими в бік радіолокатора і закривають собою територію перед будівлею (ефект накладання – *layover*).

Питання для самоконтролю

1. Які етапи включає в себе геометрична корекція, що використовує параметричні методи?

2. Що таке географічна проєкція? Як класифікуються проєкції?

3. В яких випадках може застосовуватись поліноміальне перетворення 1-го порядку?

4. В яких випадках можуть застосовуватись поліноміальне перетворення 2-го і більш високих порядків?

5. Як обчислюється мінімальна кількість опорних точок при поліноміальному перетворенні?

6. Чим відрізняються опорні і контрольні точки?

7. Як потрібно розташовувати опорні точки на знімку?

8. У чому недолік перетворення "гумовий аркуш", що використовує лінійне перетворення?

9. Чому виникає потреба у перерахунку растра?

10. Які переваги і недоліки мають методи найближчого сусіда, білінійної інтерполяції, кубічної згортки і бікубічного сплайна?

11. Як визначаються допустимі похибки (планові і висотні) для ортофотоплану заданого масштабу?

12. За яких умов можна не використовувати ЦМР у процесі виконання геометричної корекції?

XVIII. ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ

Процедуру, що забезпечує перетворення електромагнітних сигналів у оптичне зображення, називають візуалізацією, а в англомовних джерелах часто застосовують термін рендерінг (rendering).

Коли мова йде про якість зображення, то її не завжди оцінюють за точністю відтворення первинного образу або лінійністю передавання зміни параметрів. Так, наприклад, зображення, яке було отримано у сутінках або тумані, буде характеризуватись малою контрастністю, нечіткими обрисами, блідим забарвленням. Зображення, яке було отримано за допомогою інфрачервоного перетворювача, за умови безпосереднього відтворення сигналів може мати малу кількість градацій яскравості, що не дозволить виділити малоконтрастні деталі тощо. Тому часто буває корисним підкреслити, підсилити якісь особливості відтвореної сцени з метою поліпшення її суб'єктивного сприйняття.

Покращення зображення входить до найбільш простих і вражаючих сфер цифрової обробки зображень. Власне, методи покращення зображень спрямовані на виявлення погано помітних деталей або просто підкреслення потрібних характеристик на початковому зображенні.

Відомим прикладом покращення є посилення контрасту зображення, тому що в результаті "воно виглядатиме краще". Важливо мати на увазі, що покращення якості – дуже суб'єктивна сфера в обробці зображень.

Відновлення зображень – це сфера, також пов'язана з підвищенням візуальної якості зображення, проте, на відміну від власне покращення, критерії якого суб'єктивні, відновлення зображення є об'єктивним у тому сенсі, що методи відновлення зображень спираються на математичні або ймовірні моделі спотворень (перекручень) зображення.

18.1. Загальні відомості про методи покращення зображень

Головною метою покращення зображення є така обробка, коли результат є більш відповідним з точки зору *конкретного* застосування. Слово *конкретне* тут є важливим, оскільки воно з самого початку встановлює, що методи, які обговорюються далі, значною мірою є проблемно орієнтованими. Так, наприклад, метод, що є корисним для покращення рентгенівських зображень, не обов'язково виявиться найкращим для обробки знімків Марса, що були передані космічним апаратом. Проте, незалежно від застосованих методів, покращення зображень є одним із найцікавіших і найпривабливіших з позиції візуального аналізу сфер обробки зображень.

Просторові перетворення зображень загалом включають дискретизацію, квантування, кодування, геометричні перетворення, а також логічні та арифметичні операції.

Дискретизація – це процес заміни безперервного зображення дискретним, тобто розбиття на окремі пікселі.

Квантування – це процес заміни безперервних значень яскравості пікселів на дискретні, обмежений набір значень.

Кодування – це процес подання дискретних значень пікселів у вигляді послідовності бітів для зберігання або передачі.

Геометричні перетворення – це перетворення, які змінюють положення пікселів на зображенні, наприклад, масштабування, обертання, зсув, перспективні перетворення.

Логічні та арифметичні операції – це операції, які застосовуються до значень пікселів для зміни їх яскравості, контрасту або інших характеристик.

У деяких перетвореннях при цьому використовуються локальні дані з околиці пікселя, в інших – інформація про всі елементи зображення. До першої групи перетворень, що називається *просторовою фільтрацією*, відносяться перетворення, засновані на операції згортки. До другої групи перетворень, що називається *частотною фільтрацією*, відносяться перетворення, засновані на перетворенні Фур'є. Проте і просторова, і частотна фільтрація дозволяють розв'язувати задачі як перетворення зображення, так і зменшення рівня його зашумленості.

Просторові перетворення використовуються для різних цілей, таких як покращення якості зображень, виділення певних об'єктів, стиснення даних, а також для різних наукових та інженерних додатків. Вони дозволяють здійснювати обробку зображення, одержаного при ДЗЗ, з метою виділення меж об'єктів з різною відбивною здатністю, видалення дрібних деталей для покращення виявлення його крупних елементів, зменшення завад тощо [69; 116].

Покращення зображення (Image enhancement) – це процес подання зображення у формі, яка є більш придатною для його подальшого використання.

Методів покращення зображень існує дуже багато [102]. До них відносять, наприклад, задачі видалення із зображення просторових завад та шуму, задачі підкреслення границь перепадів яскравості, задачі зміни контрасту, псевдофарбування тощо. Відмінною рисою даних методів є те, що для їх розв'язання не робиться ніяких спроб оцінити викривлення, що виникають на етапах формування та реєстрації зображень.

Методи покращення якості зображень зазвичай застосовують для ідентифікації зображених територій і об'єктів, визначення місця їх розташування, для отримання інформації про їх зображувальні властивості та ознаки. Покращення зображень дозволяє підкреслити найважливіші ознаки зображення і полегшити завдання інтерпретації.

Покращення зображень проводять для візуального аналізу об'єктів на багатозональних знімках і виконують завдяки зміні яскравості та контрастності всього зображення або його окремих частин; виділенню контурів заданої контрастності; фільтрації значень яскравості (згладжуваності); кольоровому синтезу і кодуванню кольорів.

Множина підходів покращення зображень поділяється на дві великі категорії:

– методи обробки в просторовій ділянці (*просторові методи*);

– методи обробки в частотній ділянці (*частотні методи*).

Термін *просторова ділянка* відноситься до площини зображення, і ця категорія об'єднує підходи, що ґрунтуються на прямому маніпулюванні пікселями зображення.

Методи обробки в *частотній ділянці* ґрунтуються на модифікації сигналу, що формується шляхом застосування до зображення перетворення Фур'є.

Треба усвідомлювати, що загальної теорії покращення зображень, на жаль, не існує. Коли зображення обробляється для візуальної інтерпретації, саме дослідник виступає остаточним експертом того, наскільки добре виступає конкретний метод. Візуальне оцінювання якості зображення є вкрай суб'єктивним процесом, що робить поняття "гарного зображення" деяким ефемерним критерієм, за допомогою якого потрібно порівнювати ефективність алгоритму. У випадках, коли метою є обробка зображення для машинного сприйняття, завдання оцінювання дещо простіше. Наприклад, у завданні розпізнавання символів найкращим (залишаючи осторонь інші питання, такі як обчислювальні вимоги) буде той метод обробки зображень, який дає точніші результати машинного розпізнавання. Проте навіть за ситуації, коли проблема дозволяє встановити чіткі критерії якості, зазвичай потрібна певна кількість спроб тестування, поки буде вибраний конкретний підхід до покращення зображень.

До одного зображення можна застосовувати декілька типів покращувальних перетворень залежно від завдання використання знімка. Вибір способу перетворення пов'язаний з урахуванням характеристик різних типів підстильної поверхні в різних зонах спектра.

Спектральний простір – це набір значень спектральних яскравостей, який можна трактувати як вектор у спектральному просторі.

Розмірність простору відповідає кількості зон знімання, а координати векторів є спектральними ознаками об'єктів знімання.

Методи покращення якості зображення поділяються на:

– *спектральні,* які засновані на індивідуальних значеннях яскравості пікселів у межах кожної зони спектра, в основі яких лежить аналіз та перетворення гістограм – графічного подання розподілу спектральних яскравостей знімка.

Гістограма (рис. 18.1) відображає розподіл пікселів за яскравістю, показуючи, скільки пікселів мають кожний конкретний рівень яскравості.

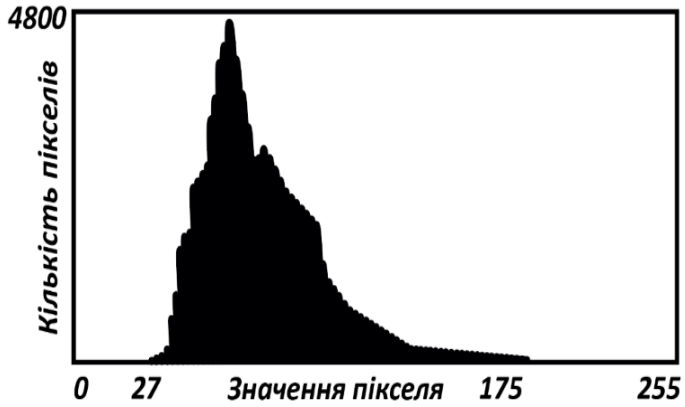


Рис. 18.1. *Графічне зображення гістограми*

Це графік, який показує, як на зображенні розподіляється яскравість. При цьому нової інформації не утворюється, відбувається лише перерозподіл початкової інформації з метою підкреслювання спектральних властивостей об'єкта:

– *просторових* – які засновані на аналізі значень сусідніх пікселів і застосовують їх або локально для деякого оточення заданого пікселя, або глобально – до всього зображення і одночасно в усіх зонах;

– *частотних*.

Методи спектрального покращення подано на рис. 18.2.

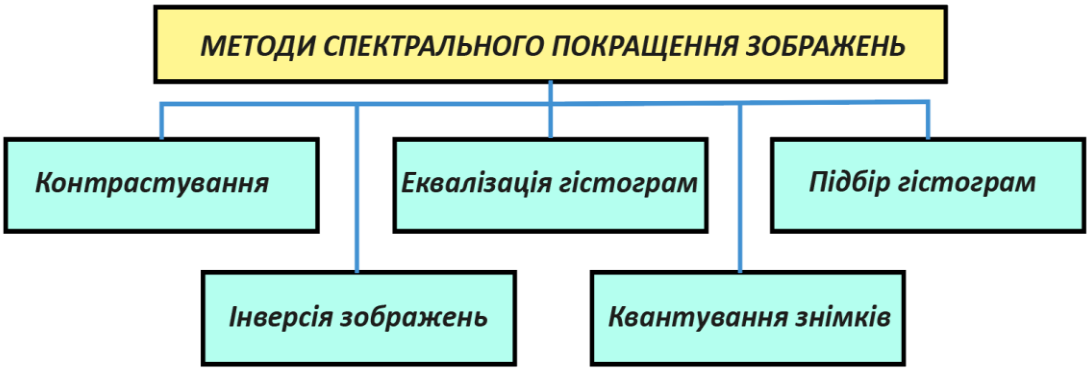


Рис. 18.2. *Методи спектрального покращення зображень*

Контрастування (перетворення контрастності) засновано на регулюванні співвідношення між яскравістю пікселів цифрового знімка в файлі та на екрані комп'ютера, яке задається спеціальною функцією – кривою відтворення яскравостей. Її відображають на графіку, на якому по горизонтальній вісі відкладено значення яскравості в файлі, а по вертикальній – значення яскравості на екрані [24].

Якщо крива відтворення яскравостей є пряма лінія, що виходить з початку координат під кутом 45º, це означає, що всі значення яскравостей з файлу відображаються такими ж значеннями яскравості на екрані. Однак загальний діапазон яскравостей знімка складає лише частину з максимально можливого. Важливо щоб головні для дешифрувальника об'єкти відобразилися з гарним проробленням. Для цього потрібно діапазон яскравостей об'єктів у файлі відобразити більш широким діапазоном яскравостей цих об'єктів на екрані, щоб посилити кольорові відміни між деталями. Тобто пряму лінію перетворюють на частково-лінійну ламану або криву лінію. У діапазоні яскравостей, що відповідає дешифрувальним об'єктам, крива відтворення яскравостей повинна мати найбільшу крутизну. Значенням яскравості, що лежать за межами яскравостей знімка, відповідають горизонтальні ділянки кривої, і вони відображаються одним значенням яскравості на екрані [24].

Для зміни і вибору оптимальної кривої відтворення яскравостей доцільно використовувати гістограму яскравостей цифрового знімка.

Гістограма (від гр. *histos* – стовп і *grámma* – риса, буква, напис) ***– діаграма, один з видів графічного зображення статистичного розподілу якихось величин за кількісною ознакою.***

Гістограма відображає по одній вісі значення яскравостей, а по іншій – кількість пікселів з такими значеннями. Чим рівномірніше розподіляються пікселі на гістограмі, тим більше відтінків можна розрізнити на екранному знімку.

Форму кривої відтворення яскравості можна задавати вручну на основі досвіду роботи або використовувати способи, рекомендовані програмами оброблення знімків. Для кольорового зображення функція передавання задається окремо для кожної спектральної зони відповідно з її діапазону ясравостей. Інтервал яскравості окремого знімка може бути дуже невеликим – 40–50 або навіть 30 рівнів. На такому знімку об'єкти відображуються майже однаково і розрізнюються важко. Якщо інтервал яскравостей розташований у нижній шкалі яскравостей, то при виведенні на екран знімок може не читатися [24].

Розглянемо методи покращення зображення, засновані на гістограмному перетворенні. Вони відносяться до найпростіших з усіх методів цифрової обробки зображень.

У задачах обробки даних ДЗЗ цією величиною є яскравість відліків зображення в тому або іншому спектральному каналі. Гістограма в цьому разі є сукупністю суміжних прямокутників, причому площа кожного з них пропорційна частоті знаходження величини яскравості у відповідному діапазон.

Перетворення гістограми – це видозміна розподілу яскравостей вихідного зображення таким чином, щоб гістограма обробленого зображення набула необхідної форми.

Існує низка способів покращення зображень. Найбільш поширений – контрастування – виконується шляхом перетворення гістограми зображення. Існує два підходи до виконання завдання: перший полягає в розтягненні гістограми, а інший – у перерозподілі значень яскравості.

Контраст *(від фр. contraste* ***– різко виражена протилежність) – суб'єктивне перебільшення відмінностей об'єктів, що сприймаються або окремих ділянок поля зору при їх просторовій або часовій суміжності в сприйнятті*** (рис. 18.3).

Рис. 18.3. *Приклад зображення об'єкта з різною контрастністю*

До задачі контрастування зображення відносять передусім узгодження його динамічного діапазону і динамічного діапазону пристрою відображення.

Відтвореному зображенню бажано надати таких властивостей, за яких сприйняття окремих, найбільш суттєвих фрагментів зображення або зображення в цілому буде зручним для спостерігача з огляду на художні або технологічні властивості цього зображення.

Якість зображення не завжди оцінюють за точністю відтворення первинного образу або лінійністю передачі зміни параметрів. Наприклад, зображення, яке було отримано у сутінках або тумані, буде характеризуватись малою контрастністю, нечіткими обрисами, блідим забарвленням.

Зображення, яке було отримано за допомогою інфрачервоного перетворювача, за умови безпосереднього відтворення сигналів, може мати малу кількість градацій яскравості, що не дозволить виділити малоконтрастні деталі. Часто буває корисним підкреслити або підсилити якісь особливості відтвореної сцени з метою поліпшення її суб'єктивного сприйняття [40].

Методи підвищення контрастності знімків спрямовані виключно на те, щоб покращити їх візуальне сприйняття. Потреба використання цих методів виникає зазвичай через особливості знімальної апаратури.

Системи дистанційного зондування, що призначені для глобальних досліджень Землі, розробляються з урахуванням найрізноманітніших умов зйомки і властивостей об'єктів, які можуть характеризуватись як високою, так і дуже низькою відбивною здатністю.

Тому датчик прагнуть сконструювати таким чином, щоб він мав максимально широкий динамічний діапазон і володів якомога більшою радіометричною розрізненністю (кількість біт на піксель).

Однак умови експлуатації цих датчиків і обмежена пропускна здатність каналів передачі даних на наземні пункти прийому інформації накладають істотні обмеження на радіометричне розрізнення. В той же час сучасні пристрої відображення інформації володіють в кілька разів більшою радіометричною розрізненністю. А це приводить до того, що контрастність знімків при перегляді виявляється занадто низькою і спостерігається яскраво виражений перекіс у бік малих рівнів яскравості. На темних ділянках таких зображень деталі найчастіше виявляються нерозрізненими [112; 60].

18.2. Глобальне перетворення контрасту

Глобальне перетворення контрасту в контексті обробки зображень відноситься до зміни діапазону яскравості і кольорів усього зображення, на відміну від локального перетворення, яке зачіпає тільки певні ділянки.

Метою глобального перетворення контрасту є покращення видимості і розрізнення деталей зображення. Воно може бути реалізовано різними способами, такими як налаштування яскравості, контрастності, гамми або використання гістограм.

При здійсненні гістограмних перетворень, як правило, використовується одна й та ж функція для всіх пікселів зображення, тобто кожен піксель вхідного зображення трансформується, використовуючи однакові математичні операції,

що визначаються гістограмною функцією перетворення (здійснюється глобальна обробка всього знімка).

Деякі складні алгоритми гістограмного перетворення можуть використовувати різні функції перетворення для різних частин зображення, але це вже є більш спеціалізованими випадками, а не загальним правилом для гістограмних перетворень. Загалом, функція перетворення застосовується до всіх пікселів однаково [40].

Само перетворення називають контрастним розтягуванням, оскільки його основна мета полягає в тому, щоб розтягнути діапазон вихідних значень яскравості пікселів до повного діапазону яскравісних значень системи відображення інформації.

Розтягнення гістограми можна проводити наступними способами: лінійним, нелінійним, частково-лінійним та довільним.

Тангенс кута нахилу кривої перетворення можна розглядати як коефіцієнт посилення контрасту.

18.2.1. Лінійне перетворення контрасту (лінійне контрастування)

Задача контрастування пов'язана з покращенням узгодження динамічного діапазону зображення та екрану, на якому здійснюється візуалізація. Якщо для цифрового подання кожного відліку зображення відводиться 1 байт (8 біт) запам'ятовуючого пристрою, то вхідний або вихідний сигнали можуть набувати одного з 256 значень. Зазвичай робочим діапазоном використовується діапазон 0..255; при цьому значення 0 відповідає при візуалізації рівню чорного, а значення 255 – рівню білого.

Нехай, що мінімальна і максимальна яскравості вихідного зображення дорівнюють x_{min} і x_{max} відповідно. Якщо ці параметри або один з них істотно відрізняються від граничних значень яскравісного діапазону, то візуалізована картина виглядає ненасиченою, незручною, такою, що стомлює зір при спостереженні [40].

При лінійному контрастуванні використовується лінійне поелементне перетворення виду:

$$y = a \cdot x + b,$$

параметри якого a і b визначаються бажаними значеннями мінімальної y_{min} і максимальної y_{max} вихідної яскравості.

З урахуванням цього поданий вираз може набувати до виду:

$$y = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}(y_{max} - y_{min}) + y_{min}.$$

Функція лінійного контрастування зображено на рис. 18.4.

Лінійне контрастування використовують для узгодження динамічного діапазону вхідного сигналу зображення та динамічного діапазону яскравості пристрою відображення. Якщо для цифрового значення кожного відліку зображення виділяється 1 байт (8 біт) пристрою пам'яті, то вхідний або вихідний сигнали можуть набувати одного з 256 значень. Діапазон можливих значень аналогового сигналу

знаходиться у межах від 0 до 255. Зазвичай, значення 0 відповідає рівню чорного, а значення 255 – рівню білого.

Лінійне перетворення контрасту визначається виразом:

$$s = cr, \tag{18.1}$$

де s – значення яскравості пікселя після перетворення, r – значення яскравості пікселя до перетворення, c – константа, яка є найпростішим способом покращення видимого контрасту зображення.

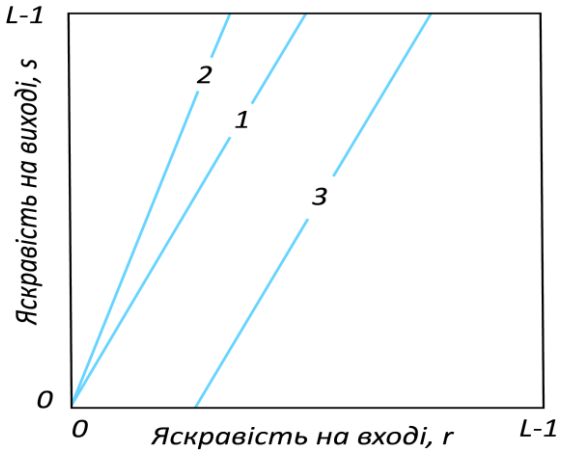


Рис. 18.4. *Лінійне перетворення контрасту*

Цей спосіб заснований на звичайному розтягуванні яскравісного діапазону [*0, L−1*] вхідних даних. Кут нахилу графіка при лінійному перетворенні може бути різним (див. рис. 18.4, криві 1 і 2), а сам графік – переміщуватись вздовж усього запропонованого діапазону яскравостей (див. рис. 18.4, криві 1 і 3).

Амплітудну характеристику даного перетворення зображено на рис. 18.5, *а* результат перетворення – на рис. 18.5, *б.*

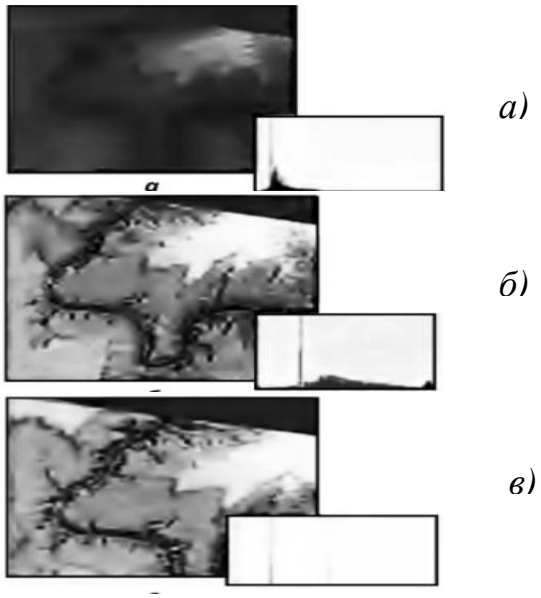


Рис. 18.5. *Контрастування зображення: а) вихідне зображення; б) лінійне розтягування гістограми; в) еквалізація*

Якщо потрібно збільшити контраст тільки невеличкого діапазону яскравостей вхідного зображення, то слід використовувати нелінійне контрастне розтягування.

18.2.2. Нелінійне перетворення контрасту (нелінійне контрастування)

Соляризація зображення. Даний різновид нелінійного контрастування отримав свою назву від слова "солярій" (*лат. solarium*, від *sol – сонце*). Результат здійснення даного перетворення зумовлює до освітлення певної частини зображення, що має рівні яскравості, які відносяться до середини динамічного діапазону. Перетворення здійснюють відповідно до співвідношення:

$$y = k \cdot x \cdot (x_{max} - x),$$

де x_{max} – максимальне значення вихідного сигналу;
k – константа, що управляє динамічним діапазоном перетвореного зображення.

Функція, що описує дане перетворення, є квадратичною, її графік при $k = 1$ зображено на рис. 18.6 [40].

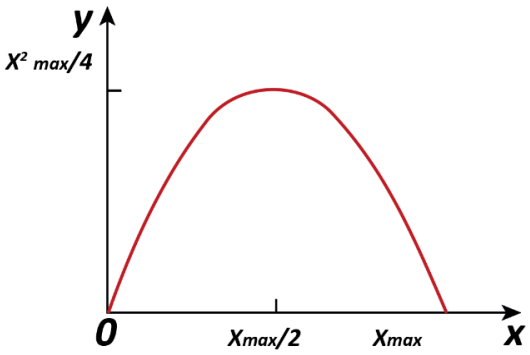


Рис. 18.6. *Графік функції соляризації*

Якщо $k = \frac{4}{x_{max}}$, то при $y_{max} = x_{max}$ динамічні діапазони зображень збігаються.

Інший спосіб нормалізації динамічного діапазону може бути здійснено шляхом застосування одного із методів контрастування, наприклад, описаного вище лінійного контрастування.

Внаслідок соляризації ділянки вхідного зображення з рівнем білого (або близьким до нього рівнем яскравості) набувають чорного рівня. Рівень білого у вихідному зображенні набувають ділянки, що мали на вході середній рівень яскравості (рівень сірого). При цьому зберігають рівень чорного і ділянки, що мають його на початковому зображенні. Рівня ж білого на виході набувають ділянки, що мають на вході середній рівень яскравості (рівень сірого) [40]. Приклад застосування соляризації наведений на рис. 18.7.

На рис. 18.7, *а* подано вихідне зображення, а на рис. 18.7, *б* – результат його соляризації. На другому етапі обробки тут застосовано лінійне контрастування при $y_{min} = 0$ і $y_{max} = 255$.

а)

б)

Рис. 18.7. *Приклад соляризації*

Обробка спричинює підвищення чіткості деталей зображення: поліпшення зображення очей, підвищення контрасту на переході "обличчя – волосся" тощо.

Цей різновид контрастування називають *препаруванням зображення*, тобто здійснення такого перетворення яскравостей певної частини динамічного діапазону, що дозволяє дослідити або підкреслити певні властивості зображення.

Препарування. Суб'єктивність сприйняття зображень людиною значно ускладнює застосування формалізованих підходів при розв'язанні деяких задач їх обробки. Тому найчастіше строгі математичні критерії оптимальності замінюють якісними поданнями про доцільність тієї або іншої обробки, що ґрунтуються на суб'єктивних оцінках результатів. До такого класу методів відноситься і препарування зображень.

Препарування – це клас поелементних перетворень зображень, більшість із яких має власну назву (перетворення з пороговою характеристикою або бінаризація, зріз за яскравістю, інверсне контрастування, зональне лінійне контрастування тощо). Препарування використовується, коли потрібно підкреслити, посилити якісь риси, особливості, нюанси спостережуваного зображення з метою покращення суб'єктивного сприйняття.

Основні характеристики процедур препарування, що використовуються на практиці, подано на рис. 18.8.

Оскільки при виконанні процедур препарування на результат здійснює вплив значення інтенсивності тільки в оброблювальній точці, то така обробка отримала назву поелементної.

Сутність поелементної обробки зображень зводиться до наступного.

Нехай $x(i,j) = x_{i,j}$, $y(i,j) = y_{i,j}$ – значення яскравості вихідного й отримуваного після обробки зображень відповідно в точці кадра, що має декартові координати i (номер рядка) і j (номер стовпця).

Поелементна обробка означає, що існує функціональна однозначна залежність між цими яскравостями:

$$y_{i,j} = f_{i,j}(x_{i,j}),$$

яка дозволяє за значенням вихідного сигналу визначити значення вихідного продукту. В загальному випадку, як це враховано в даному виразі, вид або параметри

функції $f_{i,j}(\cdot)$, що описують обробку, залежать від поточних координат. При цьому обробка є *неоднорідною.* Однак у більшості практично використовуваних процедур використовується *однорідна* поелементна обробка. У цьому випадку індекси i і j у виразі можуть бути відсутніми. При цьому залежність між яскравостями вихідного та обробленого зображень описується функцією $y = f(x)$, однаковою для всіх точок кадра.

Бінаризацію (перетворення з пороговою характеристикою) зображено на рис. 18.8, *а*. Вона перетворює півтонове зображення, що містить усі рівні яскравості, на бінарне, точки якого мають тільки дві яскравості $y = 0$ або $y = y_{max}$. Така операція, що називається іноді бінарним квантуванням, може бути корисною, коли для спостерігача важливі контури об'єктів, присутніх на зображенні, а деталі, що містяться усередині об'єктів або усередині фону, не становлять інтересу [40].

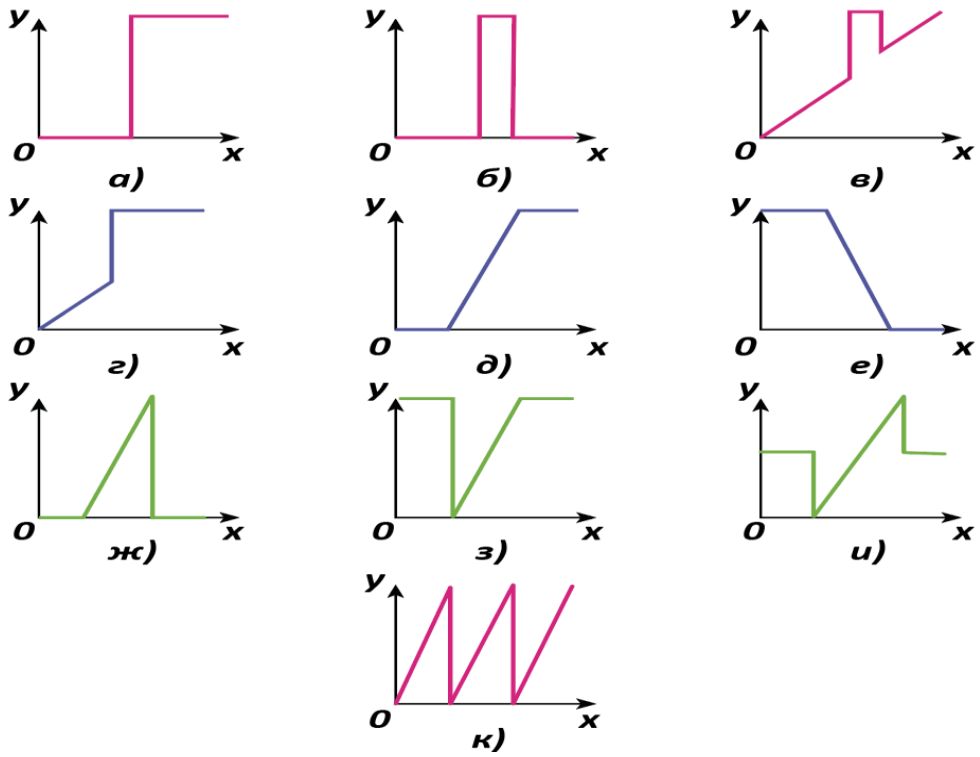
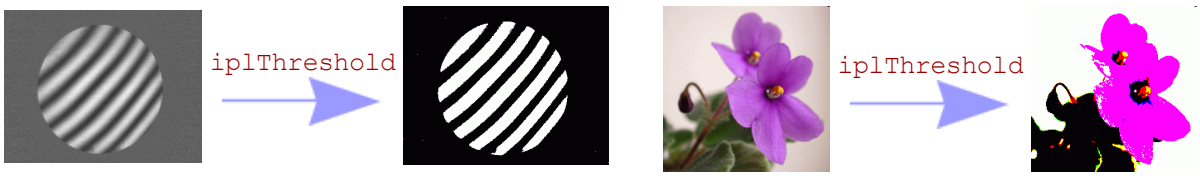


Рис. 18.8. *Приклади перетворень, які використовуються при препаруванні*

Результат виконання бінаризації з напівтоновим зображенням у бібліотеці IPL подано на рис. 18.9, *а*, а з кольоровим – на рис. 18.9, *б*.



а) *б)*

Рис.18.9. *Дія функції* ***iplThreshold*** *з пороговим значенням 128*
а) з напівтоновим зображенням; б) з кольоровим зображенням

Основною проблемою при проведенні такої обробки є визначення порогу x_0, порівняння з яким яскравості початкового зображення дозволяє визначити значення вихідного зображення в кожній його точці. Найбільш виправданим для математичного опису зображення є застосування теорії вірогідності, випадкових процесів і випадкових полів. При цьому визначення оптимального порогу бінарного квантування є статистичним завданням.

Іноді під час обробки зображень доводиться працювати з півтоновими зображеннями, які за своїм змістом майже не відрізняються від бінарних. До таких зображень належать текст, штрихові малюнки, креслення, а також відбитки пальців. Щільність імовірності $w(x)$, що описує розподіл яскравості подібного зображення, зазвичай має два чітко розділені піки. Логічно припустити, що поріг для бінарного квантування слід розташовувати посередині між цими піками, як показано на рис. 18.10.

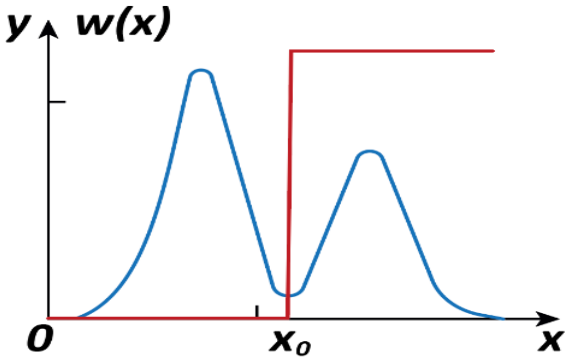


Рис. 18.10. *До вибору порогу бінарного квантування*

Заміна вихідного напівтонового зображення бінарним препаратом вирішує два основні завдання. По-перше, буде досягнуто більшої наочності під час візуального сприйняття у порівнянні з первинним зображенням. По-друге, буде відчутно скорочено обсяг пам'яті для збереження зображення, оскільки бінарний препарат для запису кожної точки бінарного зображення потребує лише 1 біт пам'яті, у той час як для запам'ятовування напівтонового зображення частіше за все слід використовувати 8 біт [40].

Приклад бінаризації відбитку пальця наведено на рис. 18.11 *б*.

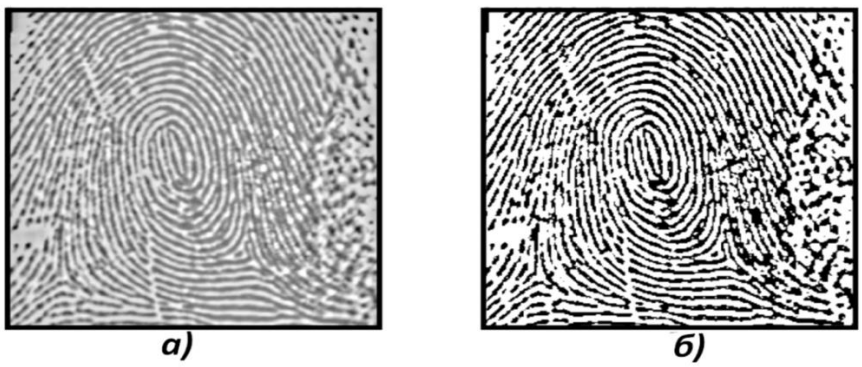


Рис. 18.11. *Приклад бінаризації зображення*

Сенс інших перетворень, поданих на рис. 18.8, також легко зрозуміти, аналізуючи їх характеристики. Наприклад, перетворення на рис. 18.8, *б* і *в* виконує яскравісний зріз, виділяючи ті ділянки зображення, яскравість яких належить певному інтервалу, тоді як решта ділянок стають повністю затемненими (їхня яскравість відповідає рівню чорного). Переміщаючи інтервал уздовж шкали яскравості або змінюючи його ширину, можна детально аналізувати зміст зображення.

Перетворення, показане на рис. 18.8, *ж*, сприяє покращенню деталізації зображення у вибраному діапазоні яскравості. На відміну від попереднього підходу, вихідне зображення в цьому разі використовує весь доступний динамічний діапазон. Таке перетворення є формою лінійного контрастування, яке застосовується до заданого діапазону яскравості вхідного зображення. Як і раніше, зони поза межами цього діапазону після обробки відображаються як чорне тло [38].

Серед нелінійних гістограмних перетворень також можна виділити логарифмічне, степеневе, шматково-лінійне.

Логарифмічне перетворення контрасту. Основні функції логарифмічних перетворень зображено на рис. 18.11.

Загальний вид логарифмічного перетворення виражається формулою

$$s=c\log(1+r). \tag{18.2}$$

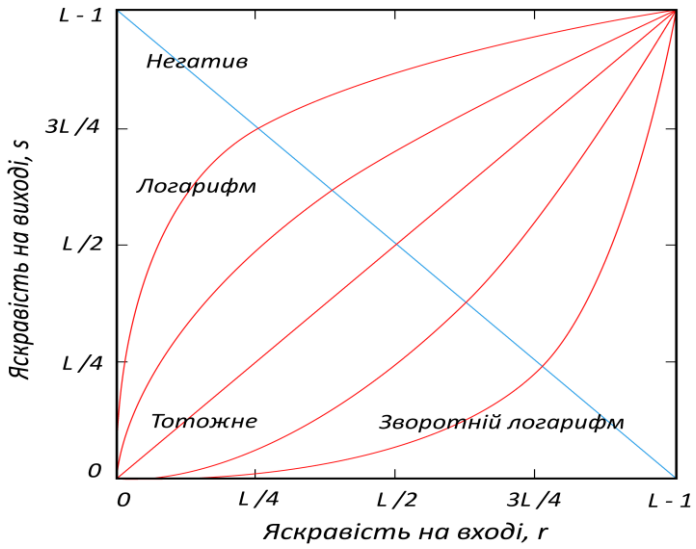


Рис. 18.11. *Основні функції гістограмних перетворень*

Передбачається, що $r \geq 0$. Дане перетворення відображає вузький діапазон малих значень яскравостей на вихідному зображенні в більш широкий діапазон вихідних значень [63].

Для більших значень вхідного сингалу правильним є зворотне твердження. Передбачається використання цього перетворення для розтягування діапазону значень темних пікселів на зображенні. Навпаки, при використанні зворотного логарифмічного перетворення відбувається розтягування діапазону значень яскравих пікселів і стиснення діапазону значень темних пікселів. Однак для цих цілей на практиці частіше використовують степеневі перетворення.

Степеневі перетворення контрасту. Степеневі перетворення мають вид

$$s = cr^{\gamma}, \tag{18.3}$$

де c і γ є позитивними константами.

Іноді рівняння (18.3) записується у вигляді $s = c(r + \varepsilon)^{\gamma}$ для того, щоб увести зміщення. Аналогічно випадку логарифмічного перетворення криві степеневих залежностей при малих степенях відображають вузький діапазон малих вхідних значень у широкий діапазон вихідних значень, при цьому для більших вхідних значень правильним є зворотне твердження (див. рис. 18.7). За традицією показник ступеня в рівнянні позначають грецькою літерою γ, а процедуру корекції з використанням степеневої функції називають гамма-корекцією.

Шматково-лінійне перетворення контрасту. Шматково-лінійне перетворення контрасту дозволяє змінювати контрастність зображення в певній області вхідних даних шляхом поділу таблиці перекодування на окремі області, наприклад: області низьких, середніх і високих яскравостей (рис. 18.12).

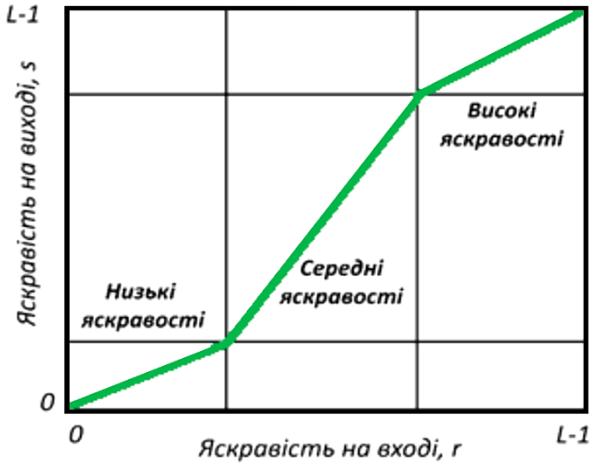


Рис. 18.12. *Шматково-лінійне контрастне розтягування*

Головна перевага шматково-лінійних функцій порівняно з нелінійними перетвореннями полягає в тому, що їх форма може бути як завгодно складною.

Основний недолік шматково-лінійних функцій полягає в тому, що для їх опису потрібно задавати значно більшу кількість параметрів. Ця техніка дуже корисна при обробці зображень із затіненими ділянками або з ділянками з низькою контрастністю.

Референтне розтягування гістограм. Дуже часто виникає завдання узгодження радіометричних характеристик низки знімків (наприклад, при їх порівнянні або складанні мозаїки). Через те, що ці знімки одержані в різний час, в різних умовах або різними датчиками, їх параметри можуть істотно відрізнятись. Одним із способів розв'язку цієї задачі є застосування методу референтного розтягування, в основі якого лежить уявлення про схожість гістограм двох знімків. В основі методу – перетворення функції розподілу значень яскравості пікселів на якусь референтну функцію, а вихідних значень пікселів – до їх референтних значень [116].

При цьому референтна функція може бути як кумулятивною функцією розподілу яскравостей іншого знімка, так і деяким модельним розподілом. Окремим випадком такого перетворення є нормальне розтягування, сутність якого полягає в лінійному розтягуванні вихідного діапазону значень пікселів так, щоб гістограма результуючого зображення мала задане середнє значення і стандартне відхилення. "Хвости" результуючої гістограми при цьому можуть обрізатись межами повного діапазону вихідних значень.

Як зазначалось попередньо, в основі методу лежить уявлення про схожість гістограм двох і більше знімків. Це припущення може виявитись помилковим, якщо за час, що минув між зйомками, на земній поверхні відбулись істотні зміни. У цьому разі застосування методу референтного розтягування буде невиправданим.

Еквалізація гістограми є нелінійним перетворенням контрасту, яке призводить:

– до зменшення контрасту на дуже світлих і темних ділянках;

– до збільшення контрасту на піках для значень, які зустрічаються найбільш часто;

– для перерозподілу середніх значень яскравості на початку і в кінці радіометричного діапазону.

Численні експериментальні дослідження засвідчили, що візуальне сприйняття зображення тим краще, чим більш рівномірною є гістограма розподілу його яскравості, тому одним із обов'язкових методів покращення якості даних ДЗЗ є вирівнювання (еквалізація) гістограми вихідного зображення (рис. 18.13).

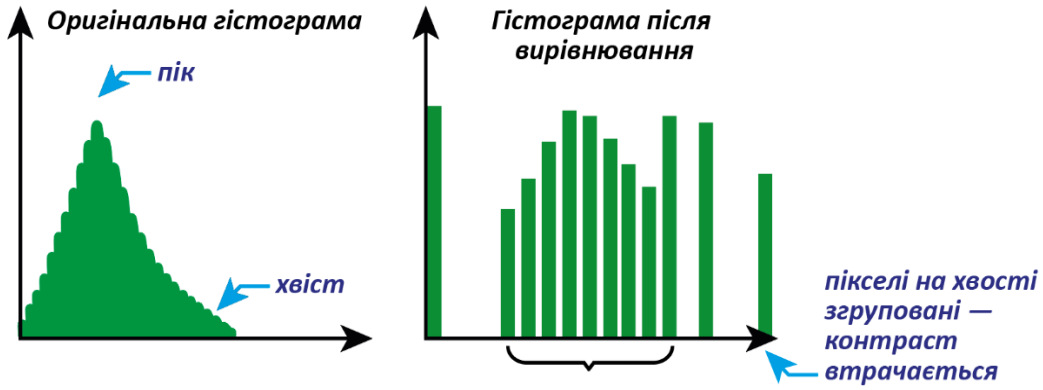


Рис. 18.13. *Приклад еквалізації гістограми*

На першому етапі вимірюється гістограма вихідного зображення. Для цифрового зображення, шкала яскравостей якого, наприклад, належить цілочисловому діапазону 0..255, гістограма є таблицею з 256 чисел. Кожне з них показує кількість точок у кадрі, що мають дану яскравість. Поділивши всі числа цієї таблиці на загальний розмір вибірки, що дорівнює кількості використовуваних точок зображення, отримують оцінку розподілу ймовірностей яскравості зображення.

На другому етапі виконується безпосередньо саме нелінійне перетворення, яке забезпечує необхідні властивості вихідного зображення. При цьому замість невідомого дійсного інтегрального розподілу використовується його оцінка, заснована на гістограмі. З урахуванням цього всі методи поелементного перетворення

зображень, метою яких є видозміна законів розподілу, отримали назву гістограмних методів. Зокрема, перетворення, при якому вихідне зображення має рівномірний розподіл, називається еквалізацією (вирівнюванням) гістограм.

Характерною рисою багатьох зображень, отримуваних у реальних зображувальних системах, є значна питома вага темних ділянок і порівняно мала кількість ділянок з високою яскравістю. Еквалізація покликана відкоригувати картину, вирівнявши інтегральні площі ділянок із різними яскравостями.

Вирівнювання гістограми – нелінійне перетворення, при якому відбувається перерозподіл пікселів вихідного зображення таким чином, що приблизно одна й та ж кількість пікселів вихідного зображення буде потрапляти в кожний інтервал гістограми [103]**.**

Приклад наближеного вирівнювання гістограми розподілу яскравостей, коли оброблене і вихідне зображення мають неоднакову кількість рівнів квантування, подано на рис. 18.14.

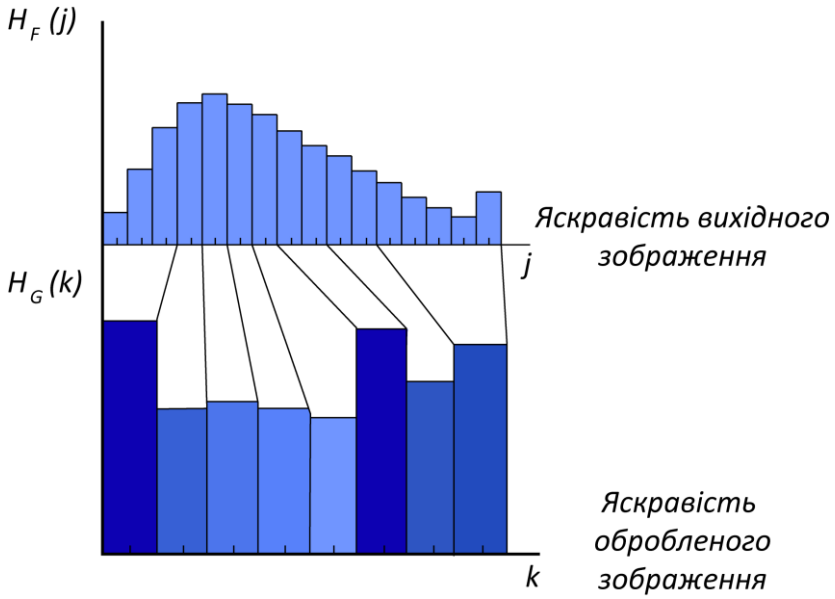


Рис. 18.14. *Приклад вирівнювання гістограми розподілу яскравостей*

Іншою перевагою розглянутого методу є те, що він дозволяє повністю автоматизувати процес обробки зображення. Інакше кажучи, процедура еквалізації гістограми базується лише на інформації, яка може бути вилучена безпосередньо з оброблюваного зображення без вказівки якихось додаткових параметрів.

18.3. Локальне перетворення контрасту

Вищезгадані перетворення, як уже зазначалось, є глобальними. Однак на практиці нерідко зустрічаються випадки, коли контрастність сильно варіюється в межах одного знімку. Причина цього – як зовнішні джерела, так і природна мінливість сюжету. Розв’язок полягає в розробці функції перетворення, заснованій на розподілі яскравостей (або інших характеристик) по околиці кожного елемента зображення.

Попередньо розглянуті методи можуть бути легко застосовані до локального покращення. Процедура полягає в тому, що навколо оброблюваного елемента задається, як правило, квадратна околиця і потім центр цієї ділянки пересувається від точки до точки. Для кожного нового положення околиці підраховується нова гістограма за точками, що до неї входять, і знаходиться функція перетворення цієї гістограми. Дана функція використовується для відображення рівня яскравості центрального елемента околиці. Потім центр переміщується на сусідній піксель і процедура повторюється. Таким чином обробляється все зображення [103].

Оскільки при переміщенні від точки до точки змінюється тільки один стовпець або рядок околиці, то стає можливим "швидке оновлення гістограми" шляхом заміни значень даних, що вибули новими. Такий підхід має очевидні переваги перед новим обчисленням гістограми при зміщенні вікна обробки. Іншим підходом, що іноді застосовується для зменшення кількості обчислень, є використання ділянок, що не перекриваються, але такий метод зазвичай призводить до появи небажаного ефекту "шахового поля".

18.4. Контрастування кольорових зображень

Колір є ознакою, що істотно спрощує дешифрування – розпізнавання об’єктів на зображенні. Це пояснюється тим, що людина має змогу розрізняти тисячі різних відтінків кольору і всього лише близько двох десятків відтінків сірого [68]. Наявність декількох спектральних каналів у даних ДЗЗ дозволяє одержувати кольорові (або кольоросинтезовані) зображення. Для цього значенням інтенсивності монохромних сигналів у трьох будь-яких каналах присвоюються відповідні яскравості червоного, зеленого і синього кольорів. Такі комбінації кольорів обумовлені тим, що всі 6–7 млн колбочок людського ока можуть бути розділені за їх сприйнятливістю до спектрального складу кольору на три основні групи, які приблизно відповідають чутливості до червоного, зеленого і синього кольорів [63].

Унаслідок таких спектральних характеристик людське око сприймає кольори як різні комбінації так званих первинних основних кольорів: червоного, зеленого і синього. Первині основні кольори можуть додаватись, утворюючи вторинні основні кольори: пурпуровий (червоний плюс синій), блакитний (зелений плюс синій) і жовтий (червоний плюс зелений). Поєднання (злиття) трьох первинних основних кольорів, або вторинного основного кольору і протилежного йому первинного, в рівних пропорціях дає білий колір.

18.4.1. Колірні моделі

Колірна модель дозволяє описати будь-який колір якимось стандартним чином. Власне, колірна модель є певною системою координат. Найчастіше на практиці використовуються моделі RGB і ISH.

Колірна модель RGB. В RGB-моделі кожен колір подається червоним, зеленим і синім первинними (основними) кольорами. В основі моделі лежить декартова система координат. Колірний простір є кубом, зображеним на рис. 18.15.

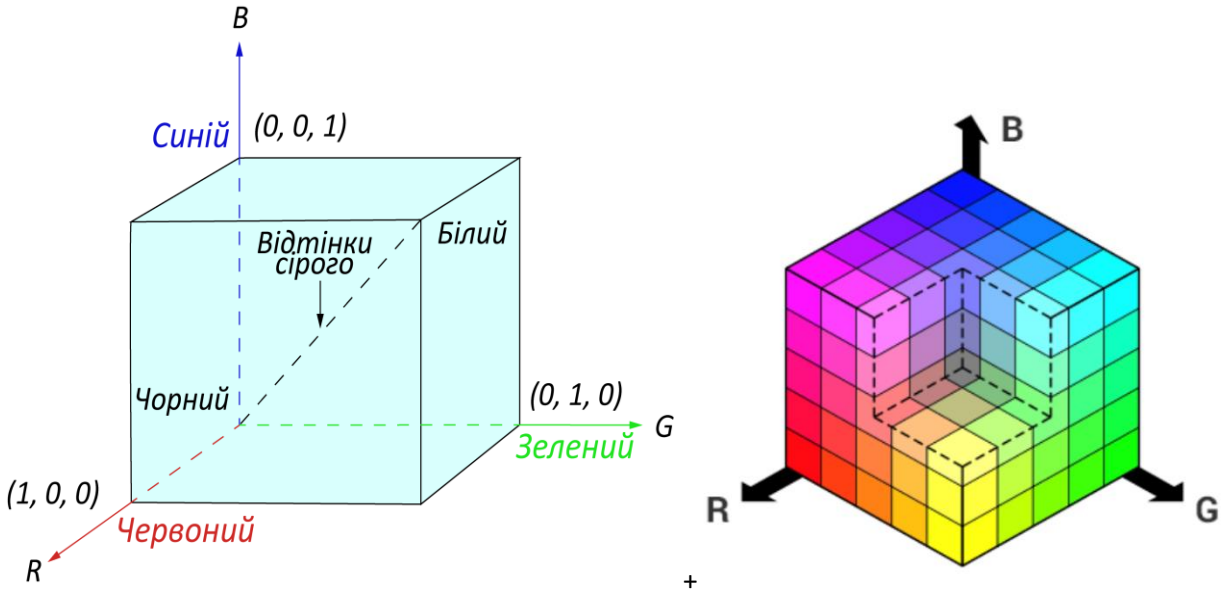


Рис. 18.15. *Схематичне зображення колірного куба RGB*

Точки, що відповідають червоному, зеленому і синьому кольорам, розташовані в трьох вершинах куба, що лежать на трьох на координатних осях. Блакитний, пурпуровий і жовтий кольори розташовані в трьох інших вершинах. Чорний колір знаходиться на початку координат, а білий – у найвіддаленішій від початку координат вершині. В досліджуваній моделі відтінки сірого (точки з рівними RGB значеннями) лежать на діагоналі, що з'єднує чорну і білу вершини.

Різні кольори в цій моделі є точками на поверхні або всередині куба і визначаються вектором, проведеним в дану точку з початку координат. Для зручності передбачається, що всі значення кольору нормовані таким чином, щоб куб (див. рис. 18.15) був одиничним, тобто всі значення R, G і B лежать в діапазоні [0, 1].

Колірна модель IHS. Недоліком RGB-моделі і їй подібних є те, що вони недостатньо пристосовані для опису кольорів таким чином, як це притаманно людині. Описуючи колір, людина не каже про відсоток в ньому кожного з основних кольорів, а оперує, як правило, такими поняттями, як колірний тон (відтінок), насиченість і інтенсивність. Колірний тон характеризує домінуючий колір, що сприймається спостерігачем, насиченість вказує, наскільки чистий колір розбавлений білим, а інтенсивність пов'язана із зоровим відчуттям напівтонової яскравості в колірному випадку.

Як зазначалося вище, усі відтінки сірого розташовані вздовж прямої (осі інтенсивності), що з'єднує чорну і білу вершини (див. рис. 18.15). Для того щоб визначити інтенсивність будь-якої точки колірного куба, потрібно провести площину, перпендикулярну осі інтенсивності так, щоб вона проходила через дану точку. При перетинанні площини з віссю вийде шукане значення інтенсивності в діапазоні [0, 1]. Таким чином, простір IHS подається множиною колірних площин, перпендикулярних осі інтенсивності. Залежно від розташування точки перетинання переріз може мати трикутну або шестикутну форму (рис. 18.16).

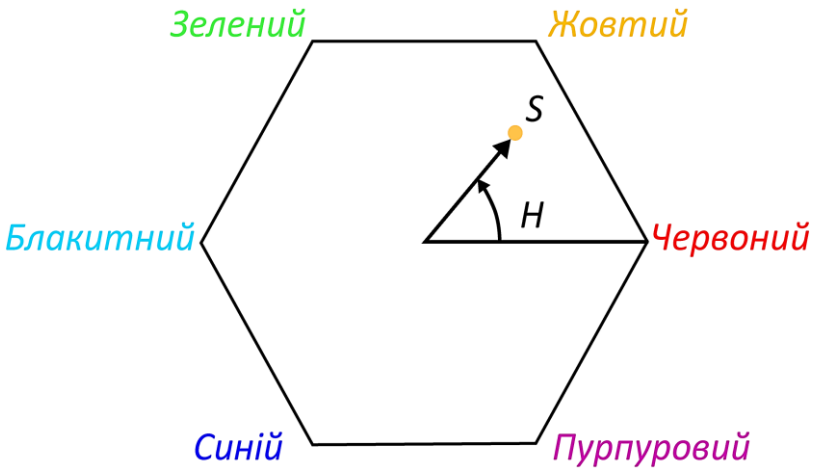


Рис. 18.16. *Колірний тон і насиченість у колірній моделі ISH*

Значення кута відраховується проти годинникової стрілки. В представленій площині перерізу видно, що основні кольори розташовані під кутом 120° відносно один одного, а вторинні кольори знаходяться під кутом 60° відносно первинних. Насиченість визначається довжиною вектора, проведеного з центра в дану точку.

18.4.2 Перетворення кольорів із системи RGB на систему IHS

Колірний тон H для кожного пікселя, заданого в RGB-форматі зображення, визначається за формулою:

$$H = \begin{pmatrix} \theta & \text{при} & B \le G \\ 360 - \theta & \text{при} & B > G \end{pmatrix}, , \tag{18.4}$$

$$\text{де } \theta = arccos\left\{\frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{1/2}}\right\}. \tag{18.5}$$

Насиченість *S* розраховується за формулою:

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)}[min(R,G,B)], \tag{18.6}$$

а інтенсивність:

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B). \tag{18.7}$$

Формули записані в припущені, що координати R, G, B нормовані так, щоб їх значення лежали в діапазоні [0, 1], і кут θ відраховується від червоної осі простору IHS, як показано на рис. 18.16.

18.4.3. Перетворення кольорів із системи IHS на систему RGB

Для того щоб за значеннями IHS в інтервалі [0, 1] одержати значення RGB у тому ж інтервалі, потрібно розглянути три випадки:

1. RG-сектор (*0 ≤ H ≤ 120*). Якщо значення H знаходиться в цьому секторі, то RGB-координати визначаються за формулами:

$$B = I(1 - S), \tag{18.8}$$

$$R = I\left[1 + \frac{ScosH}{cos(60° - H)}\right], \tag{18.9}$$

$$I = 3I - (R + B). \tag{18.11}$$

2. GB-сектор (*120 ≤ H ≤ 240*). Якщо значення H знаходиться в цьому секторі, то спочатку потрібно відняти від нього 120°:

$$H = H - 120°. \tag{18.11}$$

Після цього координати *R, G, B* визначаються за формулами:

$$R = I(1 - S), \tag{18.12}$$

$$G = I\left[1 + \frac{ScosH}{cos(60° - H)}\right], \tag{18.13}$$

$$\text{і } B = 3I - (R + G). \tag{18.14}$$

3. BR-сектор (*240 ≤ H ≤ 360*). Спочатку здійснюється перетворення

$$H = H - 240°. \tag{18.15}$$

Після цього координати *R, G, B* визначаються за формулами:

$$G = I(1 - S), \tag{18.16}$$

$$B = I\left[1 + \frac{ScosH}{cos(60° - H)}\right], \tag{18.17}$$

$$\text{і } R = 3I - (B + G). \tag{18.18}$$

18.4.4. Перетворення контрасту колірних знімків

Існують два підходи до контрастування колірних знімків, кожен з яких базується на своїй колірній моделі.

Перший підхід передбачає обробку зображення в просторі IHS. Змінювати гістограму розподілу інтенсивності або насиченості кольору можна, використовуючи ті ж алгоритми, які використовувались для обробки чорно-білих зображень.

У результаті спостерігаються цілком передбачувані ефекти. Наприклад, зміна інтенсивності приводить до більш темних або світлих зображень, а зменшення насиченості – до пастельної кольорової гами в просторі RGB. Такі перетворення гістограми дозволяють покращити візуальне сприйняття знімка без істотної зміни його кольоровості.

З іншого боку, незважаючи на те, що взаємна кореляція даних у різних частотних каналах є наявною, існують і серйозні відмінності, що обумовлені особливостями відбиття і поглинання світла тими або іншими об'єктами [112]. Для більш інформативного подання спектральної інформації в наявних даних краще скористатися RGB-моделлю.

Даний спосіб передбачає покращення візуального сприйняття кольорового знімка за рахунок незалежної видозміни гістограми яскравості *R, G* або *B* кольорів. Алгоритми розтягування гістограми в кожному каналі можуть бути однаковими (наприклад, мінімаксне розтягування), базуватись на вирівнюванні гістограм яскравості в кольоросинтезованих каналах (нормальне розтягування) або перетворення характеристик одного знімка до іншого, а можуть і сильно відрізнятись. В останньому випадку, як правило, робиться спроба добути максимум інформації з кожного каналу з урахуванням його частотних властивостей і особливостей процесу зйомки.

Розглянемо можливості контрастування з використанням колірної RGB-моделі (рис. 18.17).

На рис. 18.17, *а* подано знімок річки, що протікає в гірській місцевості. Знімок достатньо темний. Яскравість сконцентрована в зоні малих значень, проте її розподіл в *R, G* і *B* каналах відрізняється (рис. 18.16, *в, г, д* відповідно). Щоб виділити на знімку ділянки, зайняті водою, межі яких проглядаються не дуже чітко, було використане таке перетворення контрасту:

Канал R. Для виділення гірської місцевості на знімку, за зображення якої головним чином відповідає канал R, використане шматково-лінійне перетворення гістограми розподілу яскравості (рис. 18.17, *в*).

Канал G. Гістограма яскравості в цьому каналі була залишена без змін (рис. 18.17, *г*).

Канал B. Основні відбиття від водної поверхні зосереджені в цьому частотному діапазоні, тому для посилення яскравості в даному каналі була використана функція, подана на рис. 18.17, *д*.

У результаті утворилось доволі контрастне зображення водної поверхні (рис. 18.17, *б*). Багато інших деталей на знімку при цьому були втрачені, проте мета їх збереження не ставилась.

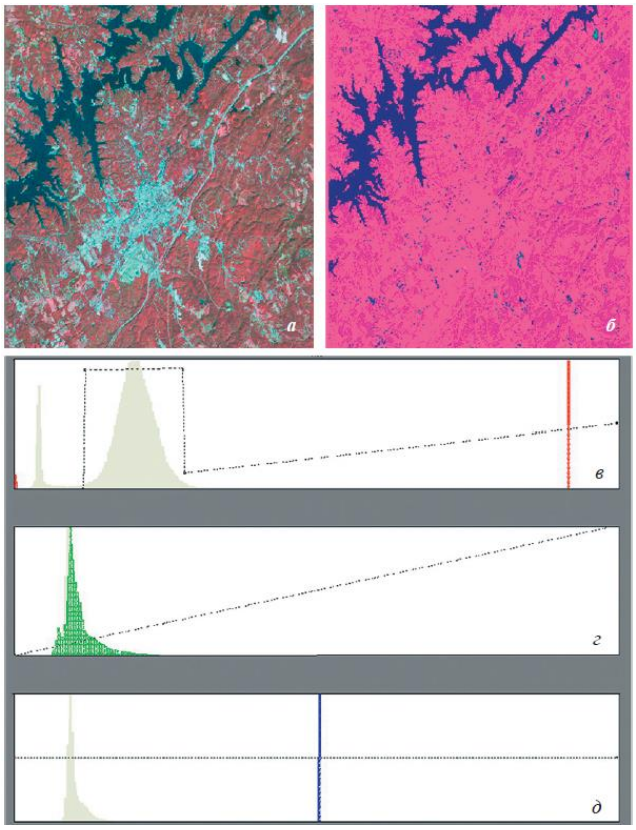


Рис. 18.17. *Приклад зміни колірного контрасту кольоросинтезованого знімка: а) вихідне зображення; б) зображення після контрастування; в) перетворення гістограми яскравості червоного кольору; г) перетворення гістограми яскравості зеленого кольору; д) перетворення гістограми яскравості синього кольору*

Перетворення контрасту кольорового зображення, засноване на його RGB-моделі в більшості випадків дозволяє суттєво збільшити інформативність знімка, проте недоліком цього методу є неконтрольована зміна комбінації кольорів, через яку колір об'єктів на результуючому зображенні може істотно відрізнятись від вихідного.

Питання для самоконтролю

1. Що потрібно враховувати при відновленні зображення?

2. Що розуміють під контрастом?

3. Як пов'язане контрастування зображення з гістограмним перетворенням?

4. У чому відмінності глобальних і локальних гістограмних перетворень?

5. Що розуміють під еквалізацією гістограми?

6. Як визначаються параметри перетворення зображення під час його лінійного контрастування?

7. Яким чином формується кольорове зображення?

8. У чому відмінність колірної моделі RGB від моделі IHS?

9. У чому особливість гістограмних перетворень кольорових знімків?

XIX. ФІЛЬТРАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ У ПРОСТОРОВІЙ ЗОНІ

Зображення, які сформовані будь-якими оптико-електронними системами і які зареєстровані за допомогою різноманітних приймачів, викривляються дією перешкод різного характеру, що ускладнює як їх візуальний аналіз, так і автоматичну обробку.

Викривлення зображення вносяться усіма компонентами зображувального приладу, починаючи з системи освітлення, як приклад, нерівномірність освітленості предмета або об'єкта, і закінчуючи оптико-механічними деталями.

Викривлення, що вносить оптична система і які відомі ще на етапі її проєктування, називаються аберраціями.

Викривлення, які вносять електронні приймачі випромінювання, наприклад ПЗЗ-матриці, називаються електронними шумами. Іноді в ролі перешкод виступають навіть ті або інші компоненти безпосередньо самого зображення. Наприклад, при аналізі супутникового знімка земної поверхні може виникнути завдання визначення кордонів між окремими ділянками – лісом і полем, водою і сушею. З погляду цього завдання окремі деталі зображення всередині розділених зон виступають перешкодою.

Ослабити дії завад можна фільтрацією. При фільтрації яскравість (сигнал) кожної точки вихідного зображення, викривленого завадою, замінюються якимось іншим значенням яскравості, яке визначається в найменшому ступені викривленим завадою.

19.1. Типи шумів

Більшість зображень піддається впливу різного роду шумів у процесі передачі їх по каналах зв'язку, а також на етапі формування.

Цифровий шум – випадкові та випадково розташовані (відсутні на реальному об'єкті) зміни яскравості або кольору пікселів.

Наявність шумів на зображенні може спричинити неточності та спотворення на етапі сегментації та розпізнавання. Наприклад, система може сприйняти шуми за окремі об'єкти, що може негативно вплинути на подальші дослідження. Шум ускладнює як візуальний аналіз зображень людиною, так й їхню автоматичну обробку. Цифровий шум, як правило, є небажаним явищем.

Шум, що з'являється на зображеннях, може бути класифікований різними способами. Він може бути корельований або некорельований, залежний або незалежний від самого реєстрованого сигналу тощо [35].

Існує багато методів поліпшення зображень, які зменшують вплив шуму, внесеного в процесі формування цифрового зображення. Знання щодо системи одержання зображень, візуальний аналіз зашумленого зображення допомагають у побудові моделі шуму й оцінці його статистичних характеристик. Математично певна модель шуму допомагає побудувати оптимальну для даного додатка систему поліпшення зображень.

Найчастіше використовуються наступні моделі шумів на зображеннях.

Імпульсний шум (шум типу "сіль і перець"). Під імпульсним шумом розуміють перекручування сигналу імпульсами, тобто викидами з дуже великими додатними або від'ємними значеннями й малою тривалістю. При обробці зображень імпульсний шум виникає, наприклад, внаслідок помилок декодування, які призводять до появи чорних і білих точок на зображенні. Тому його часто називають *точковим шумом*.

Викиди шуму особливо помітні на дуже темних або дуже світлих ділянках зображень. Імпульсний шум моделюється в такий спосіб. Поява шумового викиду в кожному пікселі *(i, j)* зображення має ймовірність *p* і не залежить ні від наявності шуму в інших точках зображення, ні від якості вихідного зображення. Значення вихідної яскравості пікселя заміняється новим значенням d (від 0 до 255).

Нехай $\{x_{i,j}\}$ – перекручене зображення. Тоді

$$x_{i,j} = \begin{Bmatrix} d \text{ з вірогідністю } p \\ s_{i,j} \text{ з вірогідністю } (1 - p) \end{Bmatrix},$$

де $ss_{i,j}$ – значення яскравості вихідного зображення.

Якщо нове значення $d = 0$, то вносяться чорні значення яскравості (шум типу "перець"), якщо $d = 255$ – білі значення яскравості (шум типу "сіль").

Параметр *d* може також набувати випадкових значень. Передбачається, що вони є незалежними випадковими величинами з гаусовим розподілом на інтервалі [0, 255]. Видалення такого шуму є більш складним завданням [35].

Адитивний шум описується співвідношенням:

$$g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y),$$

де *f(x, y)* – вихідне зображення;
g(x, y) – зашумлене зображення;
η(x, y) – адитивний і не залежний від сигналу шум з гаусовим або іншим розподілом функції щільності ймовірності.

Гаусовий шум (називаний також нормальним шумом) виникає на зображенні в результаті прояву таких факторів, як шум в електричних ланцюгах, шум сенсорів (через недолік висвітлення й/або високу температуру). Модель цього шуму широко застосовується при фільтрації зображень і сигналів, оскільки припускає незалежність і нульове математичне очікування перешкод [35].

Функція щільності розподілу ймовірностей гаусової випадкової величини *z* задається наступним виразом (рис. 19.1):

$$p(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(z-\mu)^2/2\sigma^2},$$

де *z* визначає рівень яскравості з усіх можливих значень для зображення (наприклад, для восьмибітового зображення $0 < z < 255$);
μ – середнє значення (математичне очікування) випадкової величини *z*;
σ – середньоквадратичне відхилення.

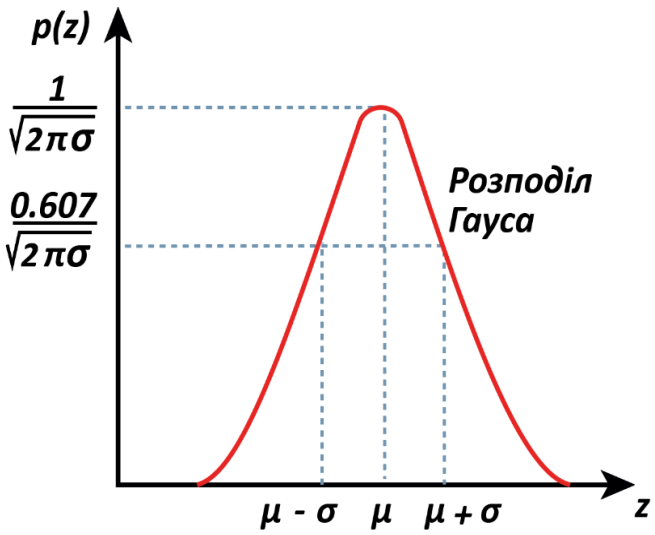


Рис. 19.1. *Функція щільності розподілу ймовірностей гаусової випадкової величини z*

Величина, яка дорівнює квадрату середньоквадратичного відхилення, називається *дисперсією* σ^2 і визначає потужність внесеного шуму [35].

Таким чином, *p(x)* визначає ймовірність того, що значення поточного відліку шуму буде мати яскравість, яка дорівнює *z*.

Якщо випадкова величина *z* описується функцією Гауса, то приблизно 67 % її значень зосереджено в діапазоні $[(\mu - \sigma), (\mu + \sigma)]$ і близько 96 % у діапазоні $[(\mu - 2\sigma), (\mu + 2\sigma)]$ [35].

Мультиплікативний шум описується співвідношенням:

$$g(x, y) = f(x, y) \cdot \eta(x, y),$$

тобто шумова складова множить прийнятий сигнал.

Прикладами такого шуму є: зернистість фотоплівки; зображення, які одержані за допомогою ультразвуку; радіолокаційні зображення [35].

Шум квантування залежить від сигналу й обраного кроку квантування значень сигналу. Наприклад, у результаті бінаризації яскравість зображення описується двома значеннями, що відповідають чорному й білому кольорам. Такий шум може робити небажані артефакти, наприклад помилкові контури навколо об'єктів, або забирати низько контрастні деталі на зображенні. Він не усувається [35].

Спекл-шум (англ. *speckle noise*), як і у всіх сканувальних системах з когерентним формуванням зображення, викликається енергетичними перешкодами через безладно розподілені відбивачі сигналу, занадто дрібних для того, щоб їх могла відобразити система.

Когерентне формування зображення – це процес створення зображення шляхом накладання когерентних хвиль.

Спекл-шум – це клас шумів, які залежать від самого сигналу зображення. Для об'єктів з низьким розрізненням найбільш поширеним є мультиплікативний шум. Спекл-шум з'являється при одержанні цифрових зображень за допомогою

радарів. Він виникає внаслідок інтерференції електромагнітних хвиль, які повертаються від цілі, що спричиняє "зернистість" на зображенні. В результаті зображення виглядає "зернистим", а на радарних зображеннях з'являються перекручування у вигляді світлих хрестів [35].

19.2. Просторові методи перетворень зображень ДЗЗ

Просторові перетворення дозволяють здійснити обробку зображень ДЗЗ з метою виділення границь об'єктів з різною відбивною здатністю, видалення дрібних деталей для покращення виявлення його великих елементів, приглушення перешкод тощо [116; 63].

Тому першим етапом обробки зображень *є фільтрація.*

В одних перетвореннях при цьому використовуються локальні дані з околиці пікселя, в других – інформація про всі елементи зображення. До першої групи перетворень, що називаються *просторовою фільтрацією*, відносяться перетворення, засновані на операції згортки.

Згортка – це процес застосування фільтра (або "ядра згортки") до зображення.

Фільтр – це невелика матриця, яку перемножають з пікселями зображення. Він рухається по зображенню, розглядаючи невеликі ділянки зображення по черзі, що дозволяє аналізувати локальні ознаки.

До другої групи перетворень, що називаються *частотною фільтрацією*, відносяться перетворення, засновані на перетворенні Фур'є. Як просторова, така і частотна фільтрації дозволяють розв'язувати задачі як перетворень зображень, так і зменшення рівня його шумів.

Термін *просторова зона* відноситься до множини пікселів, що складають зображення. Просторові методи оперують безпосередньо значеннями цих пікселів. Процеси просторової обробки описуються рівнянням:

$$g(x, y) = T[f(x, y)],$$

де $f(x, y)$ – вхідне зображення,
$g(x, y)$ – оброблене зображення;
T – оператор над f, визначений в деякій околиці точки (x, y), який може оперувати над послідовністю вхідних зображень, наприклад, виконуючи поелементне підсумовування зображень для зменшення шуму.

Головний підхід у визначенні околиці навколо точки (x, y) полягає у використанні квадратної або прямокутної зони – підмножини зображення, що центрується в точці (x, y), як це проілюстровано на рис. 19.2.

Центр цієї підмножини зсувається від пікселя до пікселя, починаючи, наприклад, з верхнього лівого кута. Оператор T виконується в кожній точці (x, y), даючи в результаті вихідне значення g для цієї точки.

Процес використовує тільки пікселі усередині зони зображення, обмеженої деякою околицею.

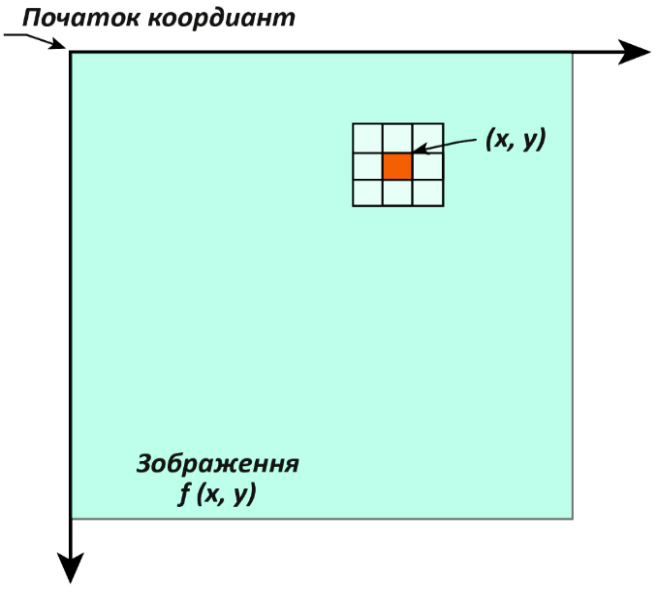


Рис. 19.2. *Околиця 3x3 навколо точки* (x, y) *зображення [63]*

Квадратні або прямокутні масиви є, безумовно, найбільш поширеними внаслідок простоти їх реалізації, хоча іноді застосовуються околиці іншої форми, наприклад такі, що наближаються до круга.

Проста форма оператора T досягається у випадку, коли околиця має розміри 1x1 (тобто один піксель). Тоді g залежить тільки від значення f в точці (x, y), і набуває змісту *функції градаційного перетворення* (*функції перетворення інтенсивностей* або *функції відображення*) виду:

$$s = T(r),$$

де для простоти позначення r і s означають, відповідно, значення яскравості зображень $f(x, y)$, і $g(x, y)$ в кожній точці (x, y).

Наприклад, якщо $T(r)$ має вигляд, зображений на рис. 19.3, *а*, то ефект від такого перетворення полягає в отриманні зображення більш високого контрасту в порівнянні з оригіналом, а також у затемненні пікселів із значеннями меншими за m і підвищенні яскравості пікселів із значеннями більшими за m на початковому зображенні.

У цьому методі, відомому як *посилення контрасту*, значення r менші за m під час наближення до рівня чорного стискаються за допомогою функції перетворення на все вужчий діапазон s. Зворотний ефект має місце для значень r більших за m. У граничному випадку, зображеному на рис. 19.3, *б*, $T(r)$ дає в результаті бінарне зображення [63].

Відображення такої форми називають *пороговою функцією*. За допомогою градаційних перетворень можуть бути побудовані деякі доволі прості, але дієві методи обробки зображень.

Оскільки результат покращення кожного елемента зображення залежить тільки від яскравості цього елемента, методи цієї категорії часто відносять до процедур *поелементної обробки*.

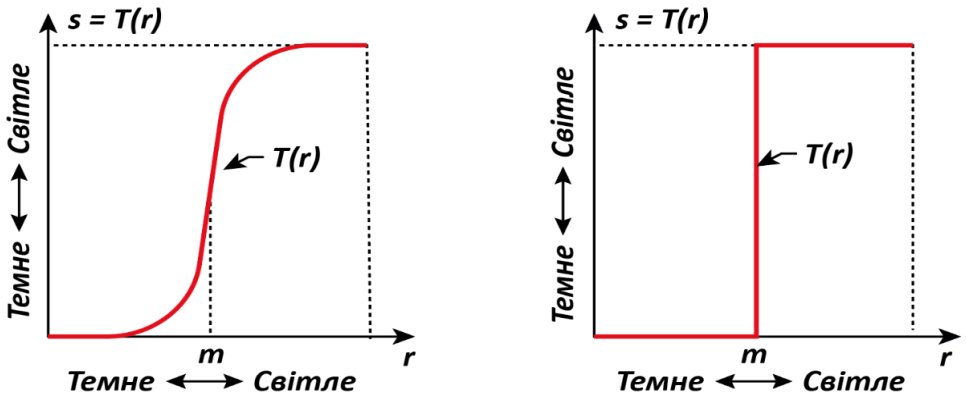


Рис. 19.3. *Градаційне перетворення для покращення контрасту*

Результатом фільтрації є оцінка корисності сигналу зображення. Це досягається завдяки тому, що зображення часто є двовимірною функцією просторових координат, що змінюються по цих координатах повільніше, ніж перешкода, що також є двовимірною функцією. Це дозволяє при оцінюванні корисного сигналу в кожній точці зображення взяти до уваги сусідні точки, скориставшись певною подібністю сигналу. В інших випадках, навпаки, ознакою корисного сигналу є різкі перепади яскравості. Однак зазвичай частота цих перепадів відносно невелика, тому на значних проміжках сигнал або постійний, або змінюється повільно. І в цьому разі властивості сигналу проявляються при спостереженні не тільки безпосередньо окремої точки, але й при аналізі її околиці.

Поняття околиці є доволі умовним. На рис. 19.4 наведена ієрархія околиць відліку, позначеного "0" [19].

9	8	7	6	7	8	9
8	5	4	3	4	5	8
7	4	2	1	2	4	7
6	3	1	0	1	3	6
7	4	2	1	2	4	7
8	5	4	3	4	5	8
9	8	7	6	7	8	9

Рис. 19.4. *Конфігурації околиць елемента "0" у кадрі зображення в ієрархічній послідовності*

"1" позначена околиця першого порядку, для якої відстань між елементами дорівнює 1. "2" позначена околиця другого порядку, до якої відносять діагональні елементи, відстань яких до центрального відліку "0" дорівнює $\sqrt{2}$. Околиця третього порядку подана елементами, що знаходяться від центрального елемента на відстані 2, і так далі.

Відповідно до рис. 19.4 формується ієрархія конфігурацій околиці центрального відліку розглянутого фрагмента кадру за зростанням відстаней від нього

до відліку околиці. Околиця може бути утворена лише найближчими сусідами, але може містити й досить багато елементів кадру.

При розгляді околиці великого розміру іноді встановлюється різний ступінь впливу далеких і близьких від центру околиці точок на сигнал, формований на виході фільтра в даній точці кадру. Таким чином, ідеологія фільтрації ґрунтується на використанні як даних поточної точки, так і її околиці.

Традиційна фільтрація в частотній зоні потребує виконання наступних кроків:

– двовимірне дискретне перетворення зображення із просторової зони в частотну (наприклад, за допомогою дискретного перетворення Фур'є);

– перетворення дискретного спектру сигналу зображення;

– обернене двовимірне дискретне перетворення, яке дозволяє відновити корисний сигнал зображення в просторовій області.

Завдання полягає в тому, щоб знайти обчислювальну процедуру, що забезпечила б одержання найкращих результатів.

Використання фільтрів для аналізу текстурованих зображень аналогічно спектральному аналізу, але має ряд переваг у тих випадках, коли характерні ознаки спектра зображення відомі. Фільтрація дозволяє більш точно розділити сигнал на складові, що відповідають різним частотним смугам.

Збільшення розмірів околиці призводить до значно більшої гнучкості. Принцип полягає в тому, що для знаходження значення g у деякій точці (x, y), використовуються значення функції усередині певної околиці заздалегідь заданої форми, що оточує точку (x, y). Один з основних підходів у такій постановці базується на використанні так званих масок (також згадуваних як *фільтри, ядра, шаблони* або *вікна*). Найчастіше маска є невеликим, наприклад, 3x3 елементи, подібно до того, що зображено на рис. 19.2. Значення коефіцієнтів маски усередині визначають сутність процесу, наприклад, підвищення різкості зображення.

Методи покращення, засновані на такому підході, часто відносять до *обробки за маскою* або *фільтрації за маскою (масочною фільтрацією)*.

Підсумовуючи наведене, можна зробити висновок, що *фільтрація базується на раціональному використанні даних як із самої робочої точки, так і з її околиці*. У цьому полягає суттєва відмінність фільтрації від розглянутих раніше процедур, які діють на рівні окремих елементів.

19.3. Просторова фільтрація

Послаблення дії перешкод можна досягти фільтрацією, при якій яскравість (сигнал) кожної точки вихідного зображення, викривленого перешкодою, замінюється якимось іншим значенням яскравості, яке вважається в найменшому ступені викривленим перешкодою.

Під просторовою фільтрацією розуміють процес виокремлення певних компонентів просторового складу зображення з їх подальшим підсиленням, ослабленням чи видаленням.

При фільтрації яскравість (сигнал) кожної точки вихідного зображення, викривленого перешкодою, замінюються якимось іншим значенням яскравості, яке визначається в найменшому ступені викривленим перешкодою.

Фільтрація зображень здійснюється в просторовій і частотній зонах. При просторовій фільтрації зображень перетворення безпосередньо виконується над значеннями відліків зображення.

Для виконання фільтрації потрібно виробити принципи таких перетворень, які ґрунтуються на тому, що інтенсивність зображення змінюється по просторових координатах повільніше, на відміну від функції перешкод. В інших випадках, навпаки, ознакою корисного сигналу є різкі перепади яскравості.

Фільтрація зображень завжди проводиться з певною метою. Зазвичай ця мета формулюється у вигляді вимог на набуття "відфільтрованими" зображеннями бажаних властивостей. Просторова фільтрація може здійснюватися за лінійними або нелінійними законами, мати локальний або глобальний характер, виконуватися безпосередньо у просторовій зоні або в зоні просторових частот за рекурсивною або за нерекурсивною схемою чи адаптивно. Вона може застосовуватися до неперервних, дискретних чи цифрових зображень, що можуть бути багатозональними, кольоровими, напівтоновими, бінарними [127; 102].

Просторова фільтрація має на меті покращення зображень та їх відновлення.

Покращення зображення *(Image enhancement)* ***– це процес подання зображення у найбільш придатній формі для подальшого використання***.

Клас задач із покращення зображень надзвичайно широкий [102]. До нього відносять, наприклад, задачі із видалення із зображення просторових перешкод та шуму, задачі з підкреслення границь перепадів яскравості, задачі у зміни контрасту, псевдофарбування тощо. Відмінною рисою даного класу задач є те, що для їх розв’язку не робиться ніяких спроб оцінити викривлення, що виникають на етапах формування і реєстрації зображень [102].

Відновлення зображення *(Image restoration)* ***– це процес одержання зображення, максимально наближеного до певного ідеального зображення.***

При розв’язанні задач відновлення зображень намагаються усунути викривлення, внесені системами формування і реєстрації зображень, зокрема числі такі, як просторовий шум, геометричні спотворення, неоднорідність тла, втрата контрасту, "розмиття" тощо. Цілком природно, що методи відновлення вимагають наявності відповідних кількісних мір і підходів для оцінювання якості відновленого зображення. Відповідні фільтри, які застосовуються для розв’язку задач відновлення зображень, називають *відновлювальними фільтрами*. Серед них найбільш відомими є інверсний і псевдоінверсний фільтри, фільтри Вінера і Бекуса – Гілберта, узагальнений фільтр Вінера, фільтри на основі методу регуляризації Тихонова та інші.

У методах фільтрації при оцінці реального сигналу в довільній точці зображення беруть до уваги певну множину (*околицю*) сусідніх точок, користуючись певною схожістю сигналу в цих точках.

Поняття околиці є доволі умовним. Околиця може бути утворена як найближчими по кадру сусідами, так і можуть бути околиці, що містять доволі багато і доволі сильно віддалених точок кадру. В цьому разі, ступінь впливу (вага)

далеких і близьких точок на рішення, що приймається фільтром у даній точці кадра, буде абсолютно різною.

При розв'язанні задач фільтрації використовують ймовірнісні моделі зображення і перешкод, та застосовують статистичні критерії оптимальності. Це пов'язано з випадковим характером перешкод і прагненням одержати мінімальну в середньому відмінність результату обробки від ідеального сигналу.

Розмаїтість методів і алгоритмів фільтрації пов'язана з великим розмаїттям математичних моделей сигналів і перешкод, а також різними критеріями оптимальності.

Нехай $x_{i,j}$ – значення яскравості зображення – корисного сигналу на перетинанні *i*-го рядка й *j*-го стовпця, а спостережуване на вході фільтра зображення описується моделлю:

$$y_{i,j} = f\left(x_{i,j}, n_{i,j}\right), i = \overline{0, I-1},\ j = \overline{0, J-1},$$

де $n_{i,j}$ – значення перешкоди в точці з координатами *(i,j)*;

f() – функція, яка описує взаємодію сигналу і перешкоди;

I та *J* – кількість рядків і стовпців у кадрі відповідно.

На рис. 19.5 показано приклади околиць різних типів, зображення у вигляді сукупностей точок. Центром околиць (робочою точкою), в якій здійснюється обробка, є незамальована точка з координатами *(i,j)*. Залежно від типу околиці розрізняють *каузальну* (а), *напівкаузальну* (б) і *некаузальну* (в) фільтрацію зображень.

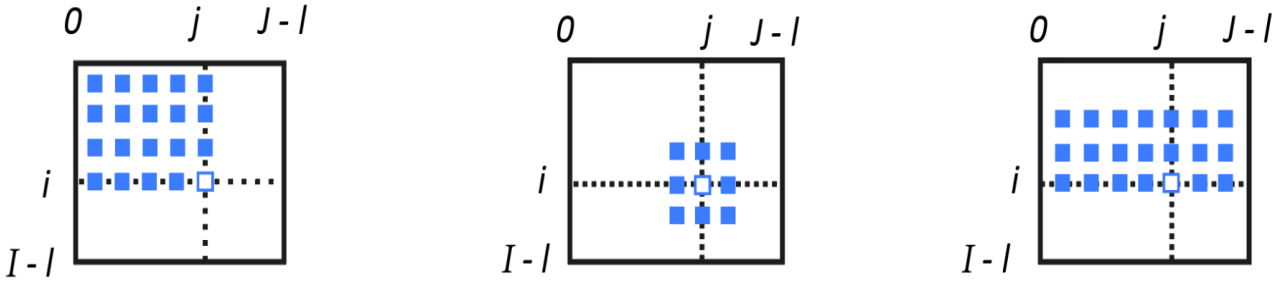


Рис. 19.5. *Приклади околиць:*
а) каузальна; б) некаузуальна; в) напівкаузальна

Каузальність, або причинність, – поняття, що описує зв'язок між подіями, коли одна подія (причина) породжує іншу подію (наслідок).

Поняття каузальності (причинно-наслідкової залежності) пов'язують із співвідношенням координат поточної точки *(i, j)* і точок, що входять до її околиці. Якщо обидві координати (номер рядка і номер стовпця) всіх точок околиці не перевищують відповідних координат поточної точки, то околиці і обробка, що використовується, називаються *каузальною*. Приклад такої околиці подано на рис. 19.5, *а*.

Деякі точки околиці, наведеної на рис. 19.5, *б*, задовольняють принцип каузальності. В той же час тут є і такі точки, обидві координати яких перевищують відповідні координати робочої точки. Фільтрація, що ґрунтується на використання околиць з поєднанням таких властивостей, називається *некаузальною*.

Якщо серед точок околиці є точки, координати яких не перевищують робочу точку в одному напрямку, але перевищують її в іншому, то фільтрація є *напівкаузальною фільтрацією* (рис. 19.5, в.).

При лінійній фільтрації вихідний ефект визначається лінійною комбінацією вхідних даних, тобто кожен вихідний піксель обчислюється як сума вхідних значень, помножених на певні коефіцієнти, і фільтрація працює за наступним алгоритмом:

1. Маємо набір вхідних даних, наприклад, зображення, де кожен піксель має своє значення.

2. Обирається зона навколо кожного вхідного пікселя, яка називається вікном або маскою.

3. Кожен піксель у вікні множиться на відповідний коефіцієнт з маски.

4. Всі отримані значення підсумовуються, а результат може бути додатково помножений на загальний коефіцієнт або масштаб.

5. Отримане значення стає значенням відповідного вихідного пікселя.

Таким чином, процес лінійної фільтрації полягає у зваженій сумі сусідніх вхідних значень, де ваги визначаються коефіцієнтами маски. Цей процес дозволяє змінювати та обробляти вхідні дані, наприклад, для зменшення шуму, виділення певних особливостей, згладжування або іншого перетворення зображення залежно від обраної маски.

Результат фільтрації визначається за формулою:

$$x^*(i,j) = \sum_{(i_1,j_1)\in S} \sum a(i_1,j_1)\cdot y(i-i_1, j-j_1),$$

де $x^*(i,j) = x^*_{i,j}$ – результат фільтрації корисного сигналу в точці кадра з координатами (i,j);

S – множина точок, що утворюють околицю;

$a(i_1,j_1)$ – вагові коефіцієнти, сукупність яких утворює собою *двовимірну імпульсну характеристику (ІХ).*

Якщо зона S кінцева, то імпульсна характеристика має кінцеву довжину і фільтр називається СІВ-фільтром (фільтрами зі скінченним імпульсним відгуком). У протилежному випадку імпульсна характеристика має нескінчену довжину, а фільтр називається НІВ-фільтром. Імпульсна характеристика не залежить від координат точки, у якій визначається вихідний ефект.

Процедури обробки зображень, що мають властивість незалежності від координат, називаються *однорідними (ізопланатичними).*

Найбільш поширеним критерієм оптимальності, що застосовується для оцінки якості обробки, слугує критерій мінімуму середнього квадрата похибок. Стосовно до фільтрації напишемо його вираз у вигляді:

$$E\left\{\left[x(i,j) - \sum_{(i_1,j_1)\in S}\sum a(i_1,j_1)\cdot y(i-i_1,j-j_1)\right]^2\right\} \underset{a(\cdot)}{min},$$

де $E\{\cdot\}$ – символ математичного очікування.

Пошук оптимального фільтра полягає у визначенні його ІХ таким чином, щоб середній квадрат похибки $\varepsilon(i,j) = x(i,j) - x^*(i,j)$, що виражає відмінність між сигналом і оцінкою, яка формується фільтром, був мінімальним.

Дуже часто при обробці прагнуть зберегти середню яскравість зображення. Математичне очікування від обох частин рівняння фільтрації можна записати таким чином:

$$m_{X^*}=m_y \cdot \sum_{(i_1,j_1)\in S} \sum a(i_1,j_1),$$

де прийнято, що середня яскравість m_y вхідного зображення $y(\cdot)$ не залежить від координат і, як результат, отримуємо, що і середня яскравість m_{X^*} вихідного зображення $x^*(\cdot)$ також постійна у всіх точках кадра. Зберегти середню яскравість зображення вдається при виконанні рівності:

$$\sum_{(i_1,j_1)\in S} \sum a(i_1,j_1) = 1,$$

що є додатковою вимогою до імпульсної характеристики фільтра.

Потенційно найкращі результати фільтрації досягаються при використанні некаузального принципу, оскільки при цьому застосовуються абсолютно всі вихідні дані при обробці кожної точки кадра.

19.4. Масочна фільтрація

У практиці цифрової обробки зображень широко використовуються *масочна фільтрація.*

Масочна фільтрація (фільтрація за допомогою маски) – це процес обробки зображень, при якому на зображення накладається "маска" (матриця чисел), що визначає вплив кожного пікселя на вихідне зображення. Це дозволяє застосовувати різні ефекти, такі як розмиття, різкість, виділення контурів тощо.

Масочна фільтрація широко використовується в обробці зображень з різною метою для покращення якості зображень; видалення шуму; виділення об’єктів; реконструкції зображень; створення ефектів.

Застосовують різні види масок. Одним із евристичних варіантів є рівномірна маска, коли всі дев’ять вагових коефіцієнтів дорівнюють 1/9, наприклад, рис. 19.6, *а* або рис. 19.6, *б*.

$$\begin{vmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

Рис. 19.6. *Приклад видів масок*

Такий вибір коефіцієнтів відповідає умові збереження середньої яскравості. У цьому разі центрувати зображення в процесі обробки не потрібно.

На практиці головним чином використовують маски симетричної форми, центри яких збігаються із центром околиці, тобто маски з розміром 3×3, 5×5 тощо.

Алгоритм застосування масочної фільтрації:

1. Створення маски. Створюється матриця (маска) певного розміру, зазвичай квадратної (наприклад, 3x3, 5x5). Кожен елемент маски містить числове значення.

2. Накладання маски. Маска переміщується по зображенню, піксель за пікселем. У кожній позиції значення пікселя зображення множиться на відповідне значення маски, а потім всі ці значення додаються.

3. Обчислення нового значення пікселя. Отримана сума ділиться на суму елементів маски (або на інше значення, якщо це потрібно) і результат стає новим значенням центрального пікселя у вихідному зображенні.

4. Повторення. Крок 2 та 3 повторюються для кожного пікселя зображення, в результаті чого отримується нове зображення, оброблене за допомогою маски.

Типи масок та їх застосування.

Розмиття (згладжування). Використовуються маски з однаковими або близькими значеннями (наприклад, середнє значення).

Різкість. Використовуються маски, які підкреслюють різницю між сусідніми пікселями (наприклад, маска лапласіана).

Виділення контурів. Використовуються маски, які виявляють зміни яскравості (наприклад, маски Собеля, Превітта).

Виділення штрихів. Маски можуть бути налаштовані для виявлення певних напрямків штрихів або ліній.

Лінійним різновидом масочної фільтрації є один з варіантів двовимірної СІВ-фільтрації. В цьому разі функцію $a(i_1, j_1)$ називають *маскою*, яка є сукупністю вагових коефіцієнтів, заданих у всіх точках околиці, які зазвичай симетрично оточують робочу точку кадра. Центр маски сполучається з аналізованим пікселем, її коефіцієнти множаться на значення яскравості пікселів, накритих маскою.

Просторова фільтрація реалізується за допомогою підсумовування із заданими вагами елементів зображення в межах вікна, що пересувається по ньому, для обчислення значення центрального пікселя для нового зображення, що формується.

Фільтрація зображення *f(x, y)*, яке має розміри *M*×*N*, за допомогою маски розмірами *m*×*n* описується формулою:

$$g(x, y) = \sum\sum w(s,t) f(x+s, y+t) st,$$

де *s* й *t* – координати елементів маски відносно до її центра (у центрі *s* = *t* = *0*).

Такого роду перетворення називаються лінійними, і їх можна виконати за допомогою операції згортки (схематично цю операцію зображено на рис. 19.7).

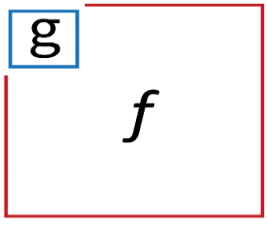


Рис. 19.7. *Операція згортки зображення f з маскою g*

Нехай f – функція яскравості зображення, а g – маска фільтра. Операція згортки зображення f за допомогою g позначається як $f \cdot g$ й описується в такий спосіб:

$$(f \cdot g)(m,n) = \sum k,l \; f(m-k,n-l)g(k,l).$$

Якщо маска не симетрична, то її треба перетворити симетрично відносно її ж центра, а потім виконати множення за цією формулою.

Ідея фільтрації зображення ґрунтується на інтегральному використанні яскравості пікселів, що потрапили в задане вікно, з урахуванням коефіцієнтів маски фільтра (рис. 19.8.).

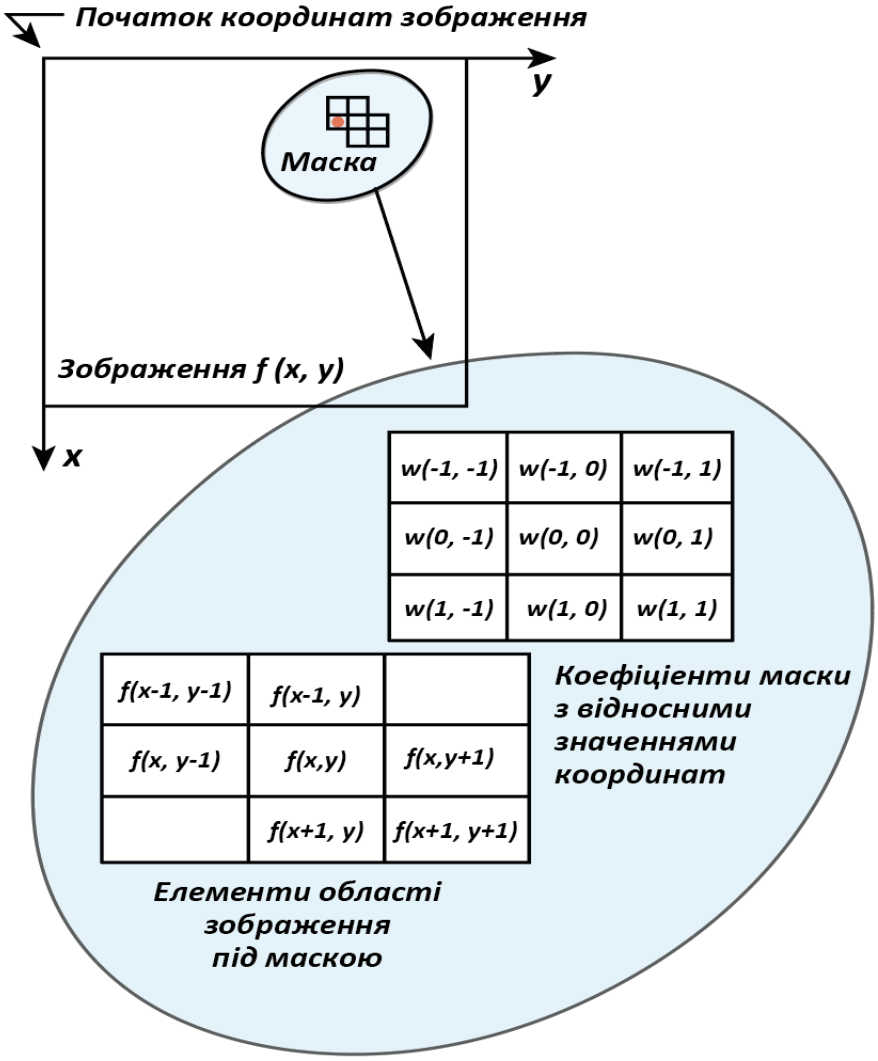


Рис. 19.8. *Зображення, вікно фільтра, накладене на піксель, показаний темними кольорами, коефіцієнти ядра фільтра (причому w(1,–1)= w((–1,1)= 0), значення яскравості пікселів, які потрапили у вікно [63]*

У цьому полягає головна відмінність фільтрації від розглянутих вище операцій обробки зображень точкового типу: фільтрація є процедурою обробки зображень локального типу. Після обчислення нового значення яскравості пікселя вікно, у якому описана маска фільтра, зсувається й обчислюється яскравість наступного пікселя. Тому подібне перетворення називають фільтрацією в ковзному вікні.

При реалізації операцій просторової фільтрації у вікні виникає невизначена ситуація, коли центр вікна близький до границі зображення й кілька елементів маски перебувають поза зображенням.

Існує три способи, що враховують цю обставину:

1) обмеження переміщення центра вікна по зображенню (тобто не вихід вікна за краї зображення);

2) розширення зображення шляхом додавання рядків і стовпців з нульовими значеннями;

3) розширення зображення, повторюючи рядки й стовпці зображення симетрично границі.

Після обробки додані рядки й стовпці видаляються. Це дозволяє одержати оброблене зображення розміром з вихідне.

Варто пам'ятати, що значення пікселів, які використалися для розширення зображення, впливають на результат фільтрації пікселя усередині граничної смуги, ширина якої залежить від розмірів околиці, використовуваної при фільтрації. Якщо околиця має розміри 5×5 пікселів, то з кожної сторони додаються по два рядка і стовпця.

Використовуючи вагове вікно (маску фільтра) 3×3 пікселя з вихідного зображення розміром 6×6, одержуємо відфільтроване зображення 4×4 пікселя (рис. 19.9).

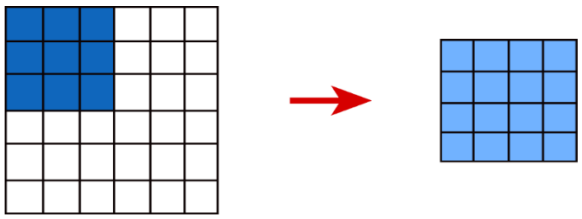


Рис. 19.9. *Формування вихідного зображення у ковзному вікні*

Локальні просторові фільтри можуть застосовувати лінійні і нелінійні операції над даними в межах області, обмеженої (ковзним) вікном що переміщується.

Класифікація фільтрів за цією ознакою наведена в табл. 19.1 [116].

Таблиця 19.1

Типи локальних фільтрів

Тип фільтра	***Вихід фільтра***	***Приклади***	***Сфери застосування***
Лінійний	*Зважена сума*	*ФНЧ; ФВЧ; ФУВЧ; ПФ*	*Корекція знімків; моделювання датчика; усунення шумів*
Нелінійний (статистичний)	*Задана статистична характеристика*	*Мінімум; максимум; медіана; стандартне відхилення; мода*	*Усунення шумів; виділення ознак; вимір відношення сигнал/шум*
Нелінійний (градієнтний)	*Вектор градієнта*	*Фільтр Робертса; фільтр Собела; фільтр Превітта*	*Виділення меж*

Вихідний сигнал лінійного просторового фільтра $g(i,j)$ є дискретною згорткою вихідного зображення $P(m,n)$ розміром $N_x \times N_y$ пікселів з імпульсною характеристикою (ІХ) вікна w розміром $W_x \times W_y$:

$$g(i,j) = \sum_{m=i-(W_x)/2}^{i+(W_x-1)/2} \sum_{n=j-(W_y-1)/2}^{j+(W_y-1)/2} P(m,n)w(i-m, j-n), \qquad (19.1)$$

де функція w центрована в точці (0, 0) і набуває ненульових значень у зоні $\pm(W_x-1)/2$ і $\pm(W_y-1)/2$. Тут потрібно зазначити, що W – непарне число.

У нелінійних локальних просторових фільтрах механізм переміщення вікна (маски) по зображенню той же, що і на рис. 19.1. Однак функція перетворення значень елементів аналізованої локальної зони для одержання результату, що відноситься до положення центру вікна, є нелінійною.

Розглянемо особливості і області застосування деяких просторових фільтрів, наведених в табл. 19.1 (лінійних: ФНЧ, ФВЧ і ФУВЧ; нелінійних: статистичних, заснованих на порядкових статистиках, і градієнтного).

19.5. Лінійна фільтрація

Лінійна фільтрація – це процес обробки сигналу, при якому вихідний сигнал є лінійною (афінною) комбінацією вхідних сигналів.

Це метод, що дозволяє виділити або відкинути певні частоти сигналу, а також виконувати інші операції обробки.

Згладжувальні фільтри. Лінійний згладжувальний (усереднювальний) фільтр – це фільтр нижніх частот. Сигнал на його виході формується в результаті згортки вхідного зображення з маскою фільтра. Приклади двох масок такого фільтра з вікном 3×3:

$$\frac{1}{9}\times\begin{matrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{matrix} \quad \frac{1}{16}\times\begin{matrix}1&2&1\\2&4&2\\1&2&1\end{matrix}.$$

Заміна елементів зображення на середньозважені значення у вікні фільтра приводить до зменшення перепадів рівнів яскравості. В результаті відбувається не тільки пригнічення шуму і дрібних порівняно з розмірами вікна елементів, але й, на жаль, і розфокусування зображення.

Фільтри підвищення різкості. Підвищення різкості (чіткості) зображення здійснюється за рахунок застосування ФВЧ, які дозволяють підкреслити дрібні або розфокусовані елементи зображення. Оскільки ця операція протилежна розфокусуванню, то для її виконання використовується операція диференціювання.

На практиці знаходить застосування також фільтр, заснований на обчисленні другої похідної. Це фільтр Лапласа, який є найпростішим ізотропним лінійним оператором, заснованим на обчисленні другої похідної (лапласіана). В дискретному вигляді двовимірний лапласіан можна записати так:

$$\nabla^2 P = [P(x+1,y) + P(x-1,y) + P(x,y+1) + P(x,y-1)] - 4P(x,y).$$

Такий фільтр, порівняно з фільтром, заснованим на обчисленні першої похідної, здійснює більш різке підкреслювання дрібних деталей на зображенні. Разом з тим, оскільки обчислення другої похідної пригнічує зони зі слабкою зміною яскравості, для відновлення фону застосовується додавання вихідного зображення і лапласіана [63].

Для підвищення різкості зображення використовується також процедура, що називається *нерізким маскуванням*. Вона полягає у відніманні з зображення $P(x,y)$ його згладженої шляхом низькочастотної фільтрації копії $P_{НЧ}(x,y)$:

$$P_{ВЧ}(x,y) = P(x,y) - P_{НЧ}(x,y).$$

Узагальненням нерізкого маскування є фільтрація з підйомом високих частот [63]. При її виконанні перший доданок у попередньому виразі множиться на коефіцієнт $A \geq 1$.

Приклади масок ФВЧ і ФУВЧ для фільтра вікном 3×3:

$$\frac{1}{9} \times \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{9} \times \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & A+8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Для виділення на зображенні елементів, що мають певний напрямок, використовують *спрямовані фільтри*. Вони також відносяться до фільтрів посилення верхніх частот, але реалізують обчислення похідної в певному напрямку.

Приклади імпульсних характеристик деяких з цих фільтрів наведено в табл. 19.2.

Таблиця 19.2

Приклади спрямованих фільтрів

Порядок похідної	**Підкреслення елементів**			
	Вертикальних	**Горизонтальних**	**Діагональних**	**З довільним кутом нахилу**
Перша	[−1 1]	$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha - \cos\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$
Друга	[−1 2 −1]	$\begin{bmatrix} -1 \\ 2 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	

Потрібно зазначити, що діагональний фільтр, крім границь, розташованих під кутом 45°, підкреслює також горизонтальні і вертикальні границі елементів зображень.

Очевидно, що внаслідок абстрактного характеру просторових фільтрів, особливо спрямованих (табл. 19.2), потрібно критично ставитися до результатів їх застосувань при наступному виконанні процедури інтерпретації елементів зображення [116].

Смугові фільтри. ***Смуговий фільтр – електронний фільтр, що пропускає сигнали в певному діапазоні (смузі) частот, і послаблює (вирізає) сигнали частот за межами цієї смуги.***

Смугові фільтри головним чином застосовуються для виділення й усунення періодичних шумів на зображенні. Смугову (BP) фільтрацію можна реалізувати послідовним застосуванням операції фільтрації нижніх (LPF) і верхніх частот (HPF):

$$BP[P(x,y)]=HPF[LPF[P(x,y)]]. \quad (19.4)$$

19.6. Особливості застосування і реалізації лінійних фільтрів

Гранична зона. При фільтрації зображення вікно фільтра не може виходити за його межі, тому результуюче зображення вікна виявляється меншим від вихідного. При використанні вікна $W\times W$ (W – непарне ціле) збереження розміру вихідного зображення рівним вхідного приводить до утворення граничної області з $W/2$ перших і $W/2$ останніх рядів і стовпець вхідного зображення (з округленням до цілого). Для заповнення цієї зони застосовують такі методи:

– повтор найближчого вихідного пікселя в кожному граничному пікселі;

– збільшення вхідного зображення за допомогою дублювання вхідних пікселів із граничної зони за його межі;

– зменшення в граничній зоні ширини або висоти вікна фільтра на один піксель;

– встановлення значення граничного пікселя, що дорівнює нулю або середньому значенню пікселя вихідного зображення;

– перехід вікна фільтра на протилежну сторону зображення для включення в розрахунок додаткових пікселів (дія, еквівалентна кільцевій згортці, що реалізується при використанні перетворення Фур'є).

Кожен із перерахованих підходів приводить до появи артефактів на межі зображення. Найменші серйозні викривлення спостерігаються при використанні першого і другого методів.

Характеристики оброблених зображень. Низькочастотна складова зображення є статично нестаціонарною, тобто її властивості (локальне середнє і дисперсія) змінюються від точки до точки, гістограма ж нагадує гістограму вихідного зображення, але характеризується меншим діапазоном значень пікселів. Високочастотна складова має статистично стаціонарне середнє значення (нуль) і дисперсію, яка залежить від локальної контрастності зображення [66]. При цьому розподіл яскравості даної компоненти зазвичай має вид гаусової кривої з дисперсією, яка істотно менша від дисперсії вихідного зображення.

Реалізація процедури лінійної фільтрації. При постійності вагових коефіцієнтів усереднювального низькочастотного фільтра він може бути реалізований у рекурентній формі, якщо зберігати й обновлювати суму значень вхідних пікселів для кожного з його стовпців [91] Так, наприклад, для фільтра з вікном 3×3 пікселя збереження в пам'яті сум для трьох сусідніх стовпців ($C_{i,j}$, $C_{i,j+1}$, $C_{i,j+2}$) дозволяє розрахувати наступні значення в *i*-й рядку на його виході по формулі:

$$g[i,(j+1)] = g(i,j) - C_{i,j} + C_{i,j+2}.$$

Якщо при обробці зображення виконується кілька послідовних процедур лінійної фільтрації, то вони можуть бути замінені однією. При цьому імпульсна характеристика єдиного фільтра визначається згорткою імпульсних характеристик вихідних. Так, при використанні двох фільтрів можна записати:

$$g = (P \cdot w_1) \cdot w_2 = P \cdot (w_1 \cdot w_2) = P \cdot w_{1,2},$$

де $w_{12} = w_1 \cdot w_2$.

Як приклад в табл. 19.3 наведено формування ІХ результуючого фільтра при виконанні послідовної фільтрації зображення двома одновимірними фільтрами.

Таблиця 19.3

Розрахунок результуючого фільтра

ІХ 1-го фільтра	ІХ 2-го фільтра	ІХ результуючого фільтра
$1/3 \bullet [1 \quad 1 \quad 1]$	$1/3 \bullet \begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix}0&0&1&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&1&0&0\end{bmatrix}$	$1/9 \begin{bmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{bmatrix}$

При визначенні ІХ двовимірного фільтра потрібно доповнити рядками нулів ІХ 2-го фільтра також угорі і знизу.

Після цього потрібно послідовно пройти по рядках вікна вікном 1-го фільтра для обчислення згортки їх імпульсних характеристик.

19.7. Нелінійна фільтрація

Статистичні фільтри. До класу нелінійних просторових фільтрів відносяться фільтри, засновані на порядкових статистиках. Відгук такого фільтра формується в результаті упорядкування значень пікселів у межах маски фільтра з вибором елемента, що знаходиться на певній позиції сформованої послідовності.

При виборі, наприклад, як елемента відфільтрованого зображення пікселя, значення якого відповідає медіані розподілу, приходять до медіанного фільтра. Медіанні фільтри, зокрема, ефективні при фільтрації імпульсних шумів – чорних і білих точок на зображенні. При цьому чорні і білі ізольовані фрагменти зображення

з площами менше половини площі маски фільтра будуть замінені на значення медіан з їх околиць.

Хоча статистичні оцінки, що розраховані в невеличкій околиці кожного пікселя, мають низьку значущість через невеличкий обсяг вибірки, вони можуть бути корисними також для виділення меж і текстури (локальна дисперсія), для підкреслювання найбільш яскравих і темних пікселів (фільтри максимуму та мінімуму).

Морфологічні фільтри. В морфологічних фільтрах здійснюється виділення максимальних і мінімальних значень для формування карти локальних максимумів або мінімумів вихідного знімка.

Дія фільтра мінімальних значень при обробці бінарних зображень ($P_{\text{бін}}$) еквівалентна дії так званого дилатаційного фільтра. Застосування фільтра максимальних значень до бінарних зображень еквівалентне ерозійному фільтру. Результат же послідовного застосування цих двох операцій називається відповідно розкриттям і згортанням:

$$\textit{розкриття}\ [P_{\text{бін}}] = \textit{дилатація}\ [\textit{ерозія}\ [P_{\text{бін}}]],$$
$$\textit{згортання}\ [P_{\text{бін}}] = \textit{ерозія}\ [\textit{дилатація}\ [P_{\text{бін}}]].$$

Терміни "дилатація" і "ерозія" відносяться до темних зон бінарного зображення. Виконання даних операцій приводить відповідно до зменшення (збільшення) розмірів світлих ділянок бінарного зображення. Основні зони застосування таких фільтрів: просторова сегментація і пригнічення шуму.

В дилатаційному й ерозійному фільтрах важливу роль відіграє форма вікна фільтрації, яка багато в чому визначає результат перетворення бінарних об’єктів [58].

Крім квадратної і прямокутної форм, вікно може мати хрестоподібну, діагональну або будь-яку іншу форму. В морфологічній обробці зображень вікно фільтрації називають *структуруючим елементом*. Такий елемент використовується для порівняння з еталонами або для зміни певних форм.

Градієнтні фільтри. Для визначення напрямку перепаду яскравості на зображенні (берегової лінії, краю тіні тощо) широко використовується метод, заснований на пороговому виділені пікселів після виконання операції високочастотної фільтрації, яка еквівалентна операції диференціювання. Градієнт такого перепаду може бути визначений за допомогою фільтрації зображення у взаємно перпендикулярних напрямках (наприклад, у горизонтальному і вертикальному з використанням спрямованих ФВЧ з табл. 19.2 з наступним обчисленням відповідного вектора:

$$g(i,l) = \sqrt{[g(i,l)]_x^2 + [g(i,l)]_y^2} \cdot exp\left[j\ arctg\frac{[g(i,l)]_y}{[g(i,l)]_x}\right].$$

Тут $[g(i,l)]x$, $[g(i,l)]y$ – горизонтальна і вертикальна проєкції вектора градієнта.

Незважаючи на розмаїтість запропонованих градієнтних фільтрів (табл. 19.4), результати їх застосування різняться лише невеличкими деталями *[116]*:

– межі, отримані за допомогою фільтрів Собела і Превітта розміром 3×3, не такі різкі, як при використанні фільтра Робертса 2×2;

– фільтри 3×3 менше посилюють шуми;

– фільтр Робертса дає результат, зміщений на пів пікселя порівняно з фільтрами, що мають розмір вікна з непарного числа елементів.

Таблиця 19.4

Приклади локальних градієнтних фільтрів

Фільтр	*Горизонтальна компонента*	*Вертикальна компонента*
Робертса	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Собела	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Превітта	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

Потрібно зазначити, що незалежно від типу фільтра обчислення градієнта є нелінійною процедурою через розрахунок модуля вектора, а використання в градієнтних фільтрах тільки локальних даних приводить до того, що при порівнянні модуля градієнта з низьким порогом виділяється велика кількість пікселів на зображенні – межі стають широкими (нечітко визначеними). Використання ж занадто високого порогу призводить до розбивки межі на окремі сегменти.

Адаптивні фільтри. До ефективних процедур пригнічення шуму відносяться фільтрація методом Лі, локальна адаптивна фільтрація, фільтрація Фроста [103], сігма-фільтр і фільтр Нагао-Мацуямі, які можна віднести до адаптивних алгоритмів, оскільки їх параметри змінюються залежно від статистичних характеристик зображення у вікні обробки. Обмеження розміру вікна, що пов'язане з неоднорідністю поверхні, призводить до помилок в оцінці параметрів фільтрів, а отже, до втрати різкості результуючого зображення.

Розглянемо деякі з названих алгоритмів. У сигма-фільтрі [87]. поділ сигналу і шуму здійснюється по контрастності, а для наступного їх усереднення використовується ковзне вікно. При цьому у вікні осереднюються значення пікселів, що відрізняються від центрального P_C не більше заданого значення Δ, що визначається в одиницях середньоквадратичного відхилення σ:

$$\Delta = k\sigma.$$

Якщо СКВ шуму залежить від корисного сигналу, фільтрацію можна зробити адаптивною, задавши Δ в одиницях локального СКВ. Однак у цьому разі фільтр стає чутливим до об'єктів більш високої контрастності, і вони, відповідно, згладжуються.

Фільтр Нагао-Мацуямі [97], на відміну від сігмафільтра, є спрямованим – розроблений для застосування до просторово-орієнтованих лінійних об'єктів. У цьому методі використовується ковзне вікно розміром 5×5, при кожному положенні якого розраховується середнє значення пікселів і СКВ в дев'яти підвікнах (рис. 19.10).

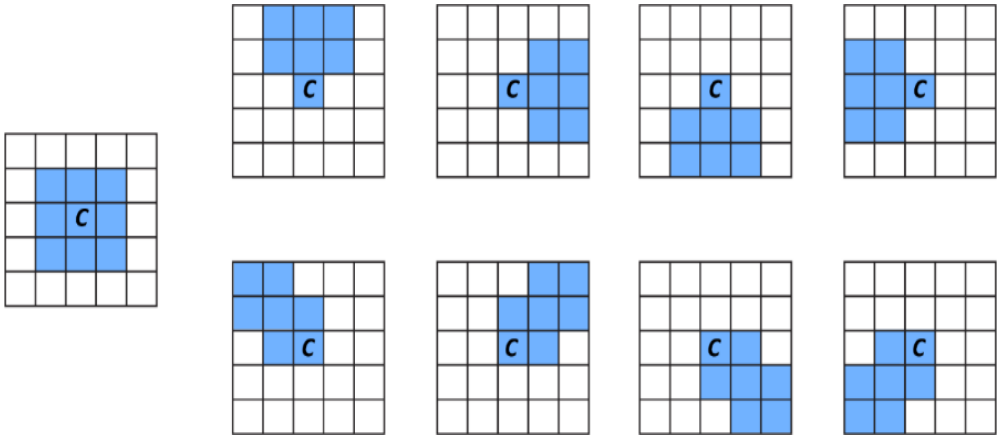


Рис. 19.10. *Дев'ять підвікон, що використовуються для обчислення локальної дисперсії значень пікселів в алгоритмі Нагао-Мацуямі*

Вихідному значенню пікселя присвоюється середнє значення найбільш однорідного підвікна, що має найменшу дисперсію.

19.8. Фільтрація в зоні просторових частот

19.8.1. Фур'є-аналіз зображення

Поряд з просторовою фільтрацією, при обробці зображень широко застосовуються процедури фільтрації в області просторових частот. При цьому використовуються пряме й обернене двовимірне дискретне перетворення Фур'є (ДПФ):

$$F_{kl} = \sum_{k=0}^{N_{x-1}} \sum_{l=0}^{N_{y-1}} P_{mn} e^{-j2\pi\left(\frac{mk}{N_x}+\frac{nl}{N_y}\right)},$$

$$P_{mn} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k=0}^{N_{x-1}} \sum_{l=0}^{N_{y-1}} F_{kl} e^{-j2\pi\left(\frac{mk}{N_x}+\frac{nl}{N_y}\right)}.$$

Тут j – уявна одиниця, а F_{kl} – комплексна амплітуда компоненти kl, що є вихідним зображенням в зоні просторових частот.

Потрібно відзначити, що на практиці дані співвідношення реалізуються з використанням процедур швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

В силу періодичності компонент даного розкладання по N_x і N_y при ДПФ неявно передбачається, що зображення нескінченно повторюється в усіх напрямках.

Відповідно результат перетворення також буде періодичною функцією. Ця властивість приводить до ефекту циклічного переходу при використанні перетворення Фур'є для реалізації просторової згортки і, крім того, вимагає реорганізації масиву коефіцієнтів F_{kl} для формування природного порядку їх проходження при знаходженні Фур'є-образу зображення. Дискретність представлення зображення в зоні просторових частот визначається співвідношеннями

$$\Delta u = \frac{1}{N_x \Delta_x} \text{ одиниць довжини}^{-1}$$

або у відносних одиницях:

$$\Delta u = \frac{1}{N_x}, \Delta u = \frac{1}{N_y} \text{ на піксель}$$

Фур'є-образ зображення можна розкласти на дійсну і уявну компоненти або на амплітудну і фазову складові:

$$F_{kl} = Re(F_{kl}) + jIm(F_{kl}) = A_{kl} \cdot exp[-j\varphi_{kl}].$$

Фазова компонента містить дуже важливу інформацію про просторову структуру зображення. Вона несе інформацію про взаємне розташування елементів на зображенні, тому її виключення приводить до істотних помилок інтерпретації. Зображення складно відобразити у відтінках сірого, якщо його амплітуда має великий динамічний діапазон, у якому переважає постійна складова. Один із способів звуження динамічного діапазону відображуваних даних полягає в логарифмуванні амплітуди спектра й обнуленні його постійної складової.

19.8.2. Фільтрація за допомогою перетворення Фур'є

Застосовуючи перетворення Фур'є до дискретної згортки вихідного зображення з ваговою функцією вікна, одержимо співвідношення, що називається теоремою про згортку:

$$G_{kl}=FT[g(i,j)]=FT[P\ w]=F_{kl}\ W_{kl}.$$

Тут FT – пряме ДПФ, F і G – спектри просторових частот вхідного і вихідного зображень, а W – комплексна частотна характеристика фільтра.

Оскільки вікно фільтра зазвичай набагато менше відображення, перед виконанням перетворення Фур'є обидва масиви повинні бути збільшені до розміру $N_x \cdot W_x - 2$, $N_y \cdot W_y - 2$, щоб забезпечити однакове положення спектральних компонент для F і W у вищенаведеній формулі. Таке розширення здійснюється шляхом доповнення нулями.

При розмірі вікна фільтрації менше 7×7 пікселів рекомендується, зазвичай, використовувати звичайний алгоритм згортки в просторовій зоні, а при великих розмірах вікна – алгоритм згортки в зоні просторових частот [103]. Дане правило також залежить від розміру зображення, швидкодії використовуваних алгоритмів і наявності спеціального обладнання для виконання згортки або ШПФ.

19.8.3. Амплітудно-частотна характеристика фільтра

З теореми про згортку випливає, що фільтри можна розглядати як мультиплікативні маски в зоні просторових частот. Наприклад, ідеальний ФНЧ має одиничну АЧХ:

$$|W_{kl}| = 1, |k| \le k_C, |l| \le l_C,$$

$$|W_{kl}| = 0, |k| > k_C, |l| > l_C,$$

де k_C і l_C – частоти зрізу.

Таким чином, ідеальний ФНЧ – це бінарна маска в Фур'є-зоні, яка повністю пропускає частотні компоненти нижче частоти зрізу, а всі інші затримує.

Потрібно зазначити, що значення АЧХ на нульовій частоті дорівнює сумі вагових коефіцієнтів фільтра:

$$|W_{kl}(0,0)| = \sum_{m=0}^{N_{x-1}} \sum_{n=0}^{N_{y-1}} w_{mn}.$$

Оскільки середнє значення зображення після фільтрації дорівнює середньому значенню вихідного зображення, помноженому на суму вагових коефіцієнтів фільтра (на значення АЧХ на нульовій частоті), то ФНЧ і ФУВЧ не змінюють середнього значення, а ФВЧ його обнуляють.

При використанні усереднюючих фільтрів виникають дві проблеми:

– відсутність осьової симетрії АЧХ у напрямках, відмінних від осей *k* і *l*;

– наявність бокових пелюсток АЧХ, що приводять в результаті фільтрації до появи додаткових відгуків від кожного з пікселів зображення.

Для зменшення рівня бокових пелюсток на практиці використовують амплітудне зважування у вікні фільтра (наприклад, по гаусовій функції), що одночасно приводить до зменшення асиметрії АЧХ.

19.9. Статистична оцінка якості зображення

Якість зображення залежить від безлічі чинників, тому для її оцінки використовують певний набір характеристик.

Контрастність. Математично контрастність визначається кількома способами

$$\mathrm{C}_{\text{відн}} = \frac{P_{max}}{P_{min}}, \tag{19.1}$$

$$\mathrm{C}_{\text{діап}} = P_{max} - P_{min}, \tag{19.2}$$

$$\mathrm{C}_{\text{скв}} = \sigma_{\text{р}}, \tag{19.3}$$

або

$$\mathrm{C}_{\text{вар}} = \frac{\sigma_P}{m_P}, \tag{19.4}$$

де $P_{\max}$ і $P_{\min}$ – відповідно максимальне і мінімальне значення, а σ_P і m_P – стандартне відхилення і математичне очікування значень пікселів зображення.

Потрібно зазначити, що кілька пікселів з дуже високими значеннями можуть сильно викривити величину $C_{\text{від}}$ або $C_{\text{діап}}$. В той же час величини $C_{\text{скв}}$ і $C_{\text{вар}}$ (коефіцієнт варіації) залежать від викидів істотно менше. Показником якості може також використовуватись видима контрастність, при якій використовуються не вихідні значення цифрового знімку, а колірні значення пікселів на екрані амонітора або безпосередньо інтенсивність світіння екрана. Однак видима контрастність залежить також і від психологічних чинників, пов'язаних з нашим сприйняттям різних просторових структур, від рівня освітленості зображення і характеристик монітора.

Коефіцієнт модуляції. При аналізі періодичних сигналів часто застосовується коефіцієнт модуляції (відношення амплітуди до середнього значення), який з деяким наближенням використовується і для характеристики зображень:

$$M = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}}. \tag{19.5}$$

Поділивши дріб у виразі (19.5) на $P_{\min}$, можна виразити коефіцієнт модуляції через один із показників контрастності:

$$M = (C_{\text{відн}} - 1) / (C_{\text{відн}} + 1), \tag{19.6}$$

Що також обумовлює його чутливість до викидів.

Відношення сигнал/шум. Добування корисної інформації із знімка ускладнює наявність шумів різної природи. Для оцінки їх рівня вводиться відношення сигнал/шум як відношення СКВ:

$$\text{с/ш}_{\text{скв}} = \frac{\sigma_{\text{сигн}}}{\sigma_{\text{шум}}}. \tag{19.7}$$

Даний вираз часто записують для квадратів амплітуд або дисперсій, а також представляють в логарифмічному масштабі.

На практиці істинний сигнал, як правило, не відомий, тому при низькому рівні шуму зашумлений знімок іноді використовують як апроксимацію сигналу, а рівень шуму оцінюють по областях, в яких сигнал практично відсутній.

Питання для самоконтролю

1. Чому підсумовуванню сусідніх відліків зображення відповідає операція його низькочастотної фільтрації?

2. Знайдіть імпульсну характеристику фільтра з вікном 1×5 для виділення межі берегової лінії, якщо фільтр, що використовується для згладжування цього зображення, має імпульсну характеристику [1/5 1/5 1/5 1/5 1/5].

3. Сформулюйте послідовність дій, необхідних для виділення межі берегової лінії в програмних комплексах з обробки даних ДЗЗ.

4. Які алгоритми фільтрації потрібно використовувати для зменшення рівня адитивного імпульсного шуму на спектрозональних зображеннях?

5. Чим обумовлена присутність мультипликативного шуму на радіолокаційних зображеннях і яким чином можна здійснити його пригнічення?

6. Побудувати імпульсну характеристику ФНЧ (3×3) з одиничними ваговими коефіцієнтами і записати вираз для виділення низькочастотних складових зображення.

7. Записати вираз для виділення високочастотних складових зображення:

а) з використанням ФНЧ, побудованого в п. 6;

б) з використанням ФВЧ; знайти імпульсну характеристику такого ФВЧ за умови формування однакових зображень у п. а) і б).

8. Поясніть ефект появи граничної зони при фільтрації на прикладі фільтра з вікном 3×3 і розкажіть про використовувані методи її заповнення.

9. Побудувати ІХ фільтра, що замінює дві послідовні операції низько-частотної фільтрації зображення двовимірним фільтром 3×3 з одиничними коефіцієнтами.

10. Яким чином у градієнтних фільтрах здійснюється визначення напрямку межі між зонами зображення?

11. Запишіть співвідношення, яке дозволяє знайти дійсну та уявну компоненти зображення через його амплітудну і фазову складові (і навпаки).

12. Зобразіть приблизний вигляд амплітудно-частотної характеристики ФНЧ, ФВЧ і ФУВЧ у напрямку осей k і l.

13. Поясніть причину появи бокових пелюсток в АЧХ фільтра на прикладі одновимірного ФНЧ з вікном [1, 1, 1, 1].

XX. СПЕКТРАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

20.1. Простір ознак. Сутність спектральних перетворень

Сучасні системи ДЗЗ забезпечують можливість одержання зображень однієї території в різних спектральних діапазонах, з різним просторовим розрізненням і в різний час. При цьому актуальною є проблема спільного аналізу цих даних з метою розв'язання задач дешифрування і класифікації спостережуваних об'єктів.

Комплексна обробка даних, отриманих у різних каналах (спектральних зонах, видах поляризації), може здійснюватися двом шляхами:

1) роздільною обробкою зображень специфічними для кожного каналу методами з наступним суміщенням в одному зображенні всієї отриманої інформації;

2) спільним аналізом даних, отриманих в оптичному, інфрачервоному, радіо- і НВЧ-діапазонах.

Первинною дешифрувальною ознакою об'єктів на цифровому космічному зображенні є інтенсивність пікселя. Формування похідних дешифрувальних ознак можливе за рахунок спільної обробки вищеперерахованих даних. Похідні дешифрувальні ознаки формуються шляхом виявлення і формалізації спектральних, структурних, текстурних та контекстних властивостей об'єктів різних класів.

Вище було показано, що дані багатозональної зйомки можуть бути представлені векторами P у K-вимірному спектральному просторі. Таким чином, елементами простору вихідних даних є значення інтенсивності (яскравості) пікселів $P_k(i,j)$.

Результат просторового або спектрального перетворення вихідного простору даних у контексті класифікації об'єктів називають простором ознак [116; 53].

Основна ідея підходу, що застосовується при комплексній обробці, полягає у формуванні із вихідних даних, отриманих в різних каналах, нового зображення за рахунок переходу від попіксельної обробки зображень по яскравісному полю до принципово нового полю ознак.

Важливо зазначити, що простір ознак не містить в собі в нової інформації про об'єкти, вони тільки дозволяють подати вихідні дані в більш зручному вигляді. Тому мета спектральних перетворень простору даних – одержання простору ознак, що має певні переваги перед вихідним спектральним простором, який дозволяє підвищити ефективність інтерпретації досліджуваних об'єктів.

Таким чином, *сутністю спектральних перетворень є перехід від простору даних до простору ознак*. Особливість цих перетворень – прагнення до пониження розмірності простору ознак порівняно з простором даних. В ідеалі – перехід до однієї інтегральної ознаки. Перспективи розв'язку цієї задачі пов'язані з розробкою універсальних перетворень, що дозволяють виявити структуру даних і відійти від аналізу властивостей одного пікселя до поняття околиці точки, текстури досліджуваної зони.

Формування простору ознак на основі спектральних перетворень передбачає процес аналізу зображення, при якому до уваги береться кореляція різних каналів одержання даних ДЗЗ, надлишковість вихідних даних, модель досліджуваної текстури, прогнозування її поведінки у часі. Це передбачає використання багатого арсеналу розроблених алгоритмів і методів, серед яких розрахунок вегетаційних індексів, аналіз головних компонент, фрактальна обробка зображень, алгоритми злиття зображень та низка інших.

20.2. Вегетаційні індекси як приклад спектральних перетворень

Одним із найбільш ефективних методів спектральних перетворень багатозональних супутникових та аерокосмічних зображень є використання *вегетаційних індексів (Vegetation Indices, VI).* Вони дозволяють переходити від вихідних значень яскравості у різних спектральних каналах до похідних величин, що характеризують стан зеленого покриву, його просторово-часову мінливість та біофізичні параметри. Основна ідея індексів полягає у порівнянні відбиття в червоній (RED) та ближній інфрачервоній (NIR) зонах спектра. Для рослинності характерне сильне поглинання у червоній області (через хлорофіл) та високе відбиття у NIR-діапазоні (зумовлене клітинною структурою листка). Саме ця контрастність робить індекси надзвичайно інформативними [116; 122].

Методологічно більшість вегетаційних індексів базуються на співвідношеннях відбитих сигналів у двох або більше спектральних зонах. Формули розробляються так, щоб мінімізувати вплив зовнішніх факторів – освітленості, атмосферного розсіювання, ґрунтового фону.

Класичним прикладом є просте зональне відношення (Ratio Vegetation Index), нормалізована різниця (NDVI), а також більш складні ортогональні чи ґрунтово-скориговані індекси.

RVI – Relative Vegetation Index визначається як:

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \tag{20.1}$$

Цей індекс підкреслює відмінності між ґрунтовим та рослинним покривом. Для голого ґрунту значення RVI наближене до 1, тоді як для густої рослинності воно перевищує 2–3 [116]. Перевага RVI – простота розрахунку, проте його недолік – чутливість до варіацій освітленості та атмосферних умов.

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index є найбільш поширеним індексом, визначається за формулою:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \tag{20.2}$$

Значення NDVI змінюється від –1 до +1. Негативні значення характерні для водних поверхонь та хмар, значення близькі до нуля – для ґрунтів і оголених

територій, а позитивні (0.2–0.9) свідчать про наявність і щільність рослинного покриву [52; 53]. NDVI став стандартом у дистанційному зондуванні Землі, оскільки забезпечує стабільні результати для різних регіонів та супутникових платформ.

Ортогональний індекс (PVI – Perpendicular Vegetation Index) враховує положення «лінії ґрунтів» у двовимірному просторі (ρ_{RED}, ρ_{NIR}).

$$PVI = \frac{\rho_{NIR} - a \cdot \rho_{RED} - b}{\sqrt{1+a^2}} \quad (20.3)$$

де:

ρ_{NIR}– коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні;

ρ_{RED}– коефіцієнт відбиття у червоному діапазоні;

a, b– параметри, що описують «лінію ґрунтів» .

Його значення дорівнює довжині перпендикуляра від точки, що відповідає конкретному пікселю, до цієї лінії [113; 52]. Таким чином, PVI зменшує вплив варіацій у ґрунтовому фоні, що робить його корисним у посушливих регіонах або на ділянках із мозаїчним покривом.

SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) який спеціально розроблений для регіонів із розрідженою рослинністю, де вплив ґрунту особливо відчутний:

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \quad (20.4)$$

де L – коефіцієнт корекції (часто $L = 0.5$) [116]. SAVI ефективно компенсує зміни у яскравості ґрунтів.

ARVI – Atmospherically Resistant Vegetation Index запропонований для зменшення впливу атмосферного розсіювання :

$$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - (\rho_{RED} - \gamma(\rho_{BLUE} - \rho_{RED}))}{\rho_{NIR} + (\rho_{RED} - \gamma(\rho_{BLUE} - \rho_{RED}))} \quad (20.5)$$

де γ– параметр корекції. Цей індекс особливо цінний у регіонах із частими атмосферними домішками та серпанком [116].

Розвиток дистанційного зондування призвів до появи численних модифікацій NDVI:

- *EVI (Enhanced Vegetation Index)* – чутливіший до густої рослинності, активно використовується у продуктах MODIS [122].

- *NDMI (Normalized Difference Moisture Index)* – дозволяє оцінювати вологість рослинного покриву, комбінуючи NIR та SWIR-канали [35].

- *GCI (Green Chlorophyll Index***)** – більш точно відображає концентрацію хлорофілу у листках. Ці індекси забезпечують додаткову інформацію про стан екосистем та агроландшафтів, особливо при інтеграції з наземними вимірюваннями.

Вегетаційні індекси є універсальним інструментом, що знаходить застосування у багатьох сферах. У сільському господарстві вони використовуються для

оцінки стану посівів, створення карт продуктивності та формування VRA-карт для диференційованого внесення добрив [122]. В екологічному моніторингу за їх допомогою здійснюється відстеження деградації земель, процесів опустелювання та динаміки лісових масивів [105]. У гідрології вегетаційні індекси застосовуються для ідентифікації заболочених земель і визначення меж водно-болотних угідь. Крім того, вони мають важливе значення у кліматичних дослідженнях, зокрема при використанні глобальних часорядів NDVI, отриманих із супутників NOAA AVHRR або MODIS, для аналізу динаміки біомів планети [60].

Завдяки простоті алгоритмів більшість сучасних ГІС та програмних пакетів для аналізу даних дистанційного зондування Землі інтегрують модулі обчислення індексів. Зокрема, у програмному комплексі **ENVI 4.7** доступна бібліотека з понад 27 індексів (Spectral → Indices) [105], у **ERDAS Imagine** індекси розраховуються через модуль *Spectral Enhancement* [60], а у **Google Earth Engine** NDVI та похідні індекси входять у стандартні алгоритми обробки супутникових даних Sentinel-2 та Landsat [35].

Вегетаційні індекси є одним із найбільш поширених інструментів аналізу супутникових знімків у наукових та прикладних дослідженнях. Їх практичне значення полягає в тому, що вони належать до найбільш інформативних спектральних перетворень зображень, підсилюють контраст між рослинністю, ґрунтами та водними об’єктами, мінімізують вплив атмосферних і топографічних факторів, дозволяють кількісно оцінювати стан посівів, прогнозувати врожайність і моніторити деградацію ландшафтів, а також інтегруються у ГІС та DSS-системи, що робить їх основою для прийняття рішень.

Простота обчислень та висока інтерпретаційна здатність призвели до того, що NDVI та його модифікації стали «золотим стандартом» у дистанційному зондуванні Землі, а вегетаційні індекси загалом – одним із найефективніших методів спектральних перетворень у прикладній геоінформатиці.

20.3. Аналіз головних компонент

Вихідні дані в різних знімальних каналах часто доволі сильно корелюють. Причинами такої кореляції можуть бути: кореляція відбивних властивостей об’єктів у різних спектральних діапазонах, топографічні особливості місцевості, перекриття спектральних (частотних) характеристик канальної апаратури.

Спектральні перетворення на основі методу головних компонент (Principal Component Analysis – PCA) використовуються для визначення статистично незалежних похідних ознак об’єктів, виділення і відображення їх спектрального контрасту. Новим простором ознак у цьому разі використовуються так звані головні компоненти багатоканального зображення.

Сутність методу пояснимо на прикладі перетворення зображень у двох спектральних зонах. Якщо розподіл значень яскравості в кожній зоні нормальний або близький до нормального, то при відображенні на площині двох зон графічно такий розподіл є еліпсами рівної ймовірності, які в статистиці називаються еліпсами розсіювання (в K-вимірному просторі це будуть гіпереліпсоїди).

Функція двовимірного нормального розподілу має вигляд:

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} - 2r\frac{(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2}\right)}. \quad (20.6)$$

де m_x, m_y, σ_x, σ_y, r – показники середнього значення, стандартного відхилення і коефіцієнт кореляції розподілів x і y відповідно. Рівняння сімейства еліпсів рівної імовірності

$$\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} - 2r\frac{(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2} = const. \quad (20.7)$$

При виконанні перетворення методом головних компонент осі спектрального простору повертаються так, щоб нові осі стали паралельні головним осям еліпса розсіювання (рис. 20.3).

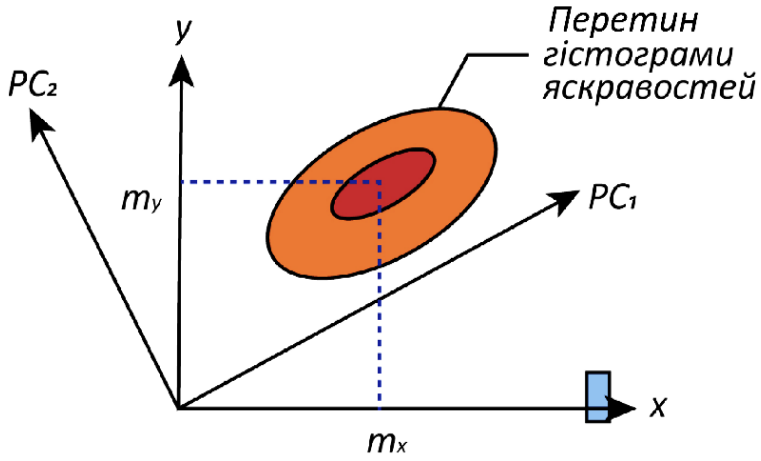


Рис. 20.3. *Двовимірне перетворення головних компонент*

Тому перша головна компонента відповідає найбільшій осі еліпса – напрямку найбільшого розкиду значень яскравості. Друга головна компонента відповідає найбільшому поперечному перетину еліпса, ортогональному до першої головної компоненти. Вона відбиває найбільше значення варіацій в даних, які ще не охоплені першою головною компонентою.

Таким чином, перетворення на головні компоненти трансформує взаємопов'язані багатозональні дані в новий набір некорельованих компонент:

$$PC = W_{pc}P, \quad (20.8)$$

де PC – результат перетворення (матриця головних компонент);
W_{pc} – матриця перетворення;
P – матриця вихідних даних.

Процедуру перетворення до головних компонент починають з обчислення коваріаційної матриці зображень між каналами *C*. Її розмірність визначається числом каналів (зон) *K*. Діагональні елементи цієї матриці C_{kk} є дисперсією інтенсивності (яскравості) зображень у каналі з номером *k*. Елементи C_{kl} визначаються через коефіцієнт кореляції ρ_{kl} між каналами *k* і *l*:

$$C_{kl} = \rho_{kl}\sigma_k\sigma_l. \tag{20.9}$$

Щоб виконати лінійне перетворення до головних компонент, з коваріаційної матриці вихідних даних повинні бути одержані власні вектори і власні значення *K* головних компонент.

Власний вектор e_k, що відповідає власному значенню λ_k коваріаційної матриці вихідних даних *C*, знаходиться із розв'язку наступного векторно-матричного рівняння:

$$(C - \lambda_k I)e_k = 0. \tag{20.10}$$

При цьому порядок розташування власних векторів такий, що перший власний вектор має найбільше власне значення, номеру інших – у порядку спадання власних значень.

Рядки матриці перетворення утворені власними векторами координатних осей простору головних компонент [116; 60].

$$W_{PC} = \begin{bmatrix} e_{11} & \dots & \dots & e_{1K} \\ \vdots & & & \vdots \\ e_{K1} & & & e_{KK} \end{bmatrix} \tag{20.11}$$

Значення елементів матриці вихідних даних у *k*-му каналі $P_k(i,j)$ перетворюються на значення *p*-й головних компонент:

$$PC_p(i,j) = \sum_k^K w_{pk}P_k(i,j). \tag{20.12}$$

Коваріаційна матриця головних компонент пов'язана з коваріаційною матрицею вихідних даних таким чином:

$$C_{PC} = W_{PC}CW_{PC}^T \tag{20.13}$$

і має вигляд:

$$C_{PC}\begin{bmatrix} \lambda_{1PC} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{2PC} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{KPC} \end{bmatrix}. \tag{20.14}$$

Перетворення до ГК приводить до оптимального перерозподілу дисперсій, при цьому сумарна дисперсія вихідних зображень зберігається. Хоча аналіз ГК

має справу з *K*-вихідними значеннями ГК, перші з них містять найбільшу частку дисперсії даних (перша ГК – понад 90 %). Тому метод ГК використовують також для стиснення даних у менше число діапазонів і, відповідно, в менше число зображень порівняно із зональними.

Разом з тим ГК вищих порядків можуть нести інформацію про невеличкі за розміром, проте важливі відмінності між об'єктами на зображеннях, одержаних у суміжних каналах.

Оскільки коефіцієнти перетворення до ГК розраховуються на основі елементів коваріаційної матриці, то, таким чином, алгоритм перетворення виявляється адаптованим до конкретної сцени. З іншого боку, ця особливість методу ускладнює порівняння результатів перетворення, одержаних для різних зображень.

В ПК ENVI перетворення на головні компоненти реалізовано в модулі Transform (рис. 20.4), в ПК ScanEx Image Processor 3.0 в меню Edit пункт Spectral Enhancement Спектральные перетворення) підпункт Principle Component Analysis [27].

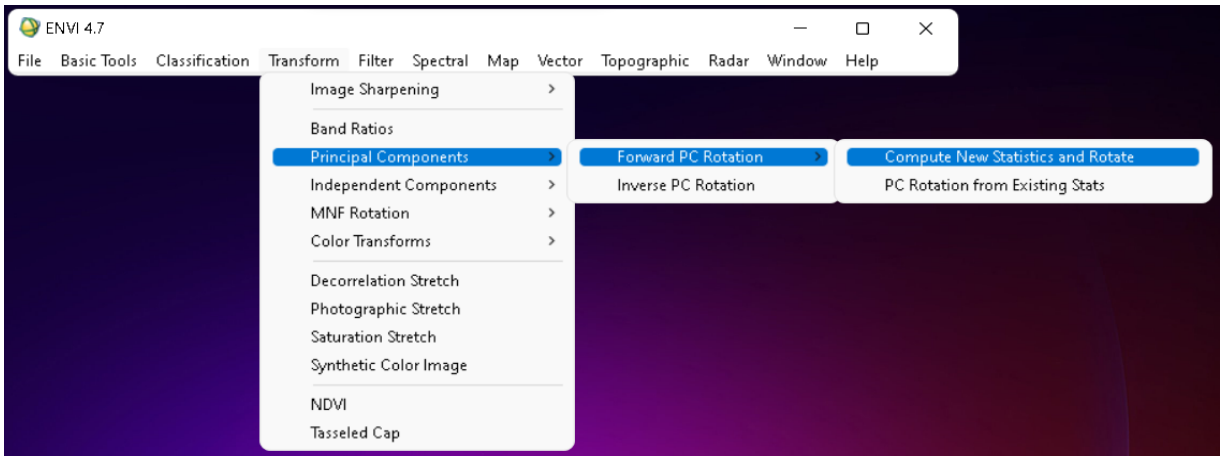


Рис. 20.4. *Процедура перетворення в головні компоненти в ПК ENVI*

Потрібно звернути увагу на той факт, що метод ГК не передбачає перехід до єдиного інтегрального параметру при аналізі даних від різних джерел. Однак цей метод дозволяє по-новому поглянути на структуру даних, що зробило його зручним інструментом попередньої обробки при комплексуванні даних ДЗЗ.

20.4. Перетворення "ковпак із пензлем"

Інший спосіб перетворення вихідних багатозональних даних на простір ознак запропонований Каутом і Томасом на основі аналізу розподілу інтенсивності відбиття від сільськогосподарських культур і ґрунту в чотирьох спектральних каналах КА Landsat. Метод, відомий також як метод Tasseled Cap, або перетворення Томаса-Каута, здійснює поворот багатовимірного еліпсоїда таким чином, щоб головні осі відповідали спектрам поглинання сільськогосподарських

культур [53; 116]. Метод отримав свою назву за формою зони розсіювання значень пікселів у новій системі координат.

У результаті численних експериментальних досліджень були виділені три головних напрямки (три похідні ознаки), які містять основну інформацію про рослинність:

1. Яскравість ґрунтів (Soil Brightness), значення пікселя, що відповідає яскравості, визначається як зважена сума всіх каналів.

2. Зеленість (Greenness) – ортогональний напрямок, що відповідає контрасту між видимими і ближнім ІЧ-каналами, які гарно відбивають кількість хлорофілу в рослинах.

3. Вологість або жовтизна (Wetness) – третій ортогональний напрямок, пов’язаний з вмістом вологості ґрунту і станом рослинності.

Лінійне перетворення простору вихідних багатозональних даних "ковпак з пензлем" повертає область даних таким чином, щоб ці напрямки стали новими осями простору ознак (рис. 20.5).

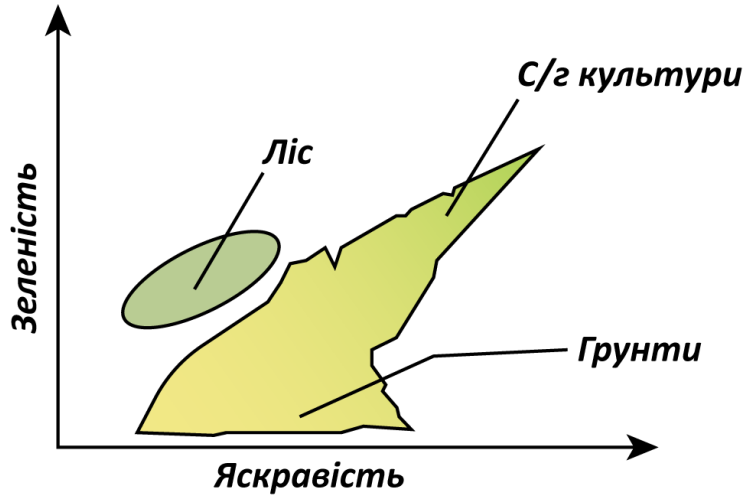


Рис. 20.5. *Приблизне розташування зображення рослинності в просторі спектральних ознак, одержане перетворенням Томаса-Каута*

Вісь ґрунтів відповідає зображенню в той період часу, коли сходи відсутні. У міру дозрівання сільськогосподарських культур їх "образ" у просторі ознак зміщується від цієї осі до осі "Зелень". З в’яненням рослин і висиханням ґрунту "образ" зміщується до третьої осі – "Вологість". Збільшення числа каналів зйомки привело до уведення додаткових осей: "Димка", "П’ята", "Шоста".

На відміну від матриці перетворення до ГК матриця перетворення "ковпак з пензлем" однакова для всіх сцен, одержаних одним сенсором. В той же час, оскільки властивості ґрунтів, рослинності і вологості різняться для різних кліматичних зон, підбір лінійних комбінацій зональних знімків має емпіричний характер. Наведені в праці [53] значення коефіцієнтів перетворення "ковпак з пензлем" відповідають зйомці території США. В ПК ERDAS Imagine алгоритм спектрального перетворення Tasseled Cap міститься в модулі Image Interpreter, меню Spectral Enhancement пункт Tasseled Cap, а в ПК ENVI 5.0 – в модулі Transform (рис 20.4) [105; 88].

20.5. Об’єднання знімків з різним просторовим розрізненням

20.5.1. Комплексування даних багатозональної зйомки. Злиття зображень

Однією з проблем комплексного використання даних ДЗЗ, одержуваних різними космічними системами, є спільна обробка зображень, сформованих у різних спектральних діапазонах, з різним просторовим розрізненням. Така проблема виникає при обробці даних багатоспектральних оптичних систем, їх об’єднанні з НВЧ радіометричними і радіолокаційними зображеннями.

Аналогічна проблема виникає при спільній обробці даних ДЗЗ, наземних вимірів і апріорних відомостей, поданих у вигляді тематичних шарів цифрових карт. Для того щоб ефективно використовувати ці дані, на даний час розроблена велика кількість методів одержання синтезованих мультиспектральних зображень зі збільшенням просторового розрізнення за рахунок їх об’єднання з панхроматичним зображенням високого розрізнення в одному кольоровому знімку.

Ці методи дозволяють також об’єднати в одному кольоровому зображенні дані, одержані в НВЧ-діапазоні за допомогою космічних РСА, і мультиспектральні знімки оптичного діапазону. Для позначення цієї процедури найчастіше усього застосовується термін "злиття зображень" (в англомовній літературі – image fusion, а також image sharpening, resolution merge). Уперше ретельний огляд методів синтезу зображень був наведений в праці [100].

На сьогодні розроблено велику кількість алгоритмів одержання синтезованих мультиспектральних зображень зі збільшенням просторового розрізнення.

У працях останніх років акцент робиться на покращенні якості результуючого зображення і зменшенні колірних викривлень. Розмаїтість реалізацій методу забезпечує адаптивність процедури до розв’язку специфічних задач тематичного дешифрування [109].

При використанні процедури злиття зображень кольорове зображення високого розрізнення утворюється в результаті послідовного виконання таких етапів:

1. Перетворення мультиспектрального зображення низького розрізнення з базису червоний – зелений – синій (RGB) у будь-який трикоординатний базис, у якому одна з координат еквівалентна розподілу яскравості і може бути замінена панхроматичним зображенням високого розрізнення.

2. Підвищення частоти дискретизації перетвореного зображення до частоти дискретизації панхроматичного зображення і наступна інтерполяція (лінійна, бікубічна, за правилом найближчого сусіда тощо).

3. Заміна яскравісної компоненти перетвореного зображення панхроматичним зображенням високого розрізнення.

4. Зворотне перетворення в базис RGB.

Численні методи злиття різняться видом перетворення спектрозональних зображень, що застосовуються на першому етапі процедури, і, власне, способом заміни однієї з компонент зображенням високого розрізнення на третьому етапі, а також алгоритмом інтерполяції, що використовується на другому етапі [73].

20.5.2. Класифікація методів злиття зображень

Усе розмаїття методів злиття зображень (Image Fusion) прийнято класифікувати за видами перетворень (рис. 20.6).

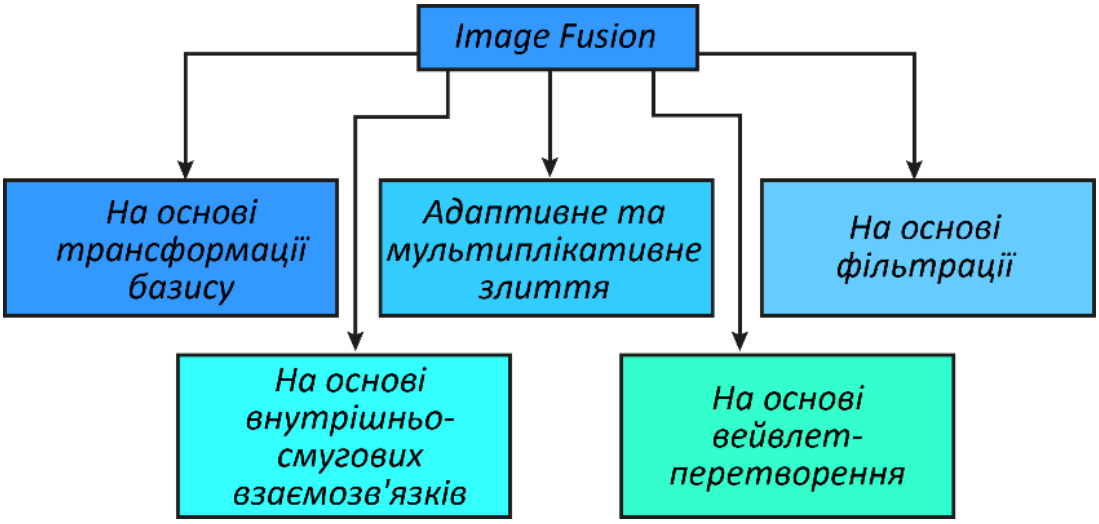


Рис. 20.6. *Схема класифікації методів злиття зображень*

Наведемо коротку характеристику цих методів.

Методи злиття, засновані на трансформації базису.

Метод прямого синтезування кольорового зображення. При використанні цього методу замість даних, що відповідають інтенсивності одного з колірних каналів зображення низького розрізнення, підставляються дані панхроматичного каналу високого розрізнення (Pan). Даний метод дуже легко реалізується, але дає найбільше порушення кольоропередачі.

Схему формування зображення методом прямого синтезування подано на рис. 20.7.

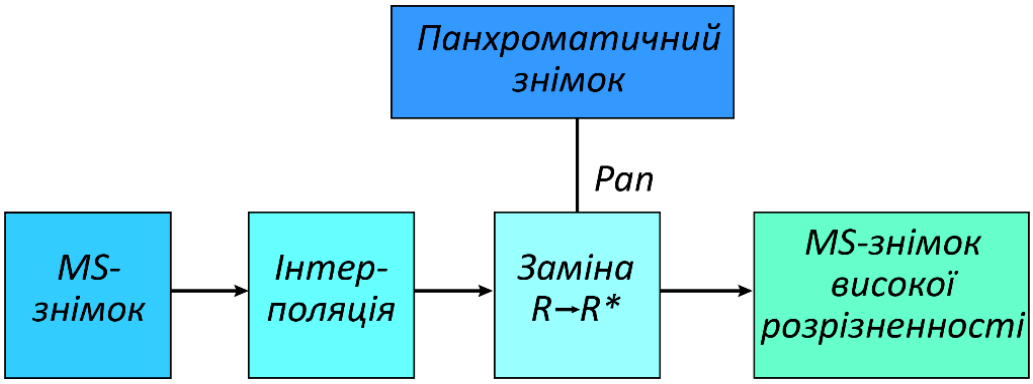


Рис. 20.7. *Схема злиття зображень методом прямого синтезування*

Через R, G, B позначені інтенсивності вихідних колірних каналів, а через R*, G*, B* – інтенсивності каналів мультиспектрального знімка високого розрізнення.

Синтезування на основі методу ГК (Principal Component Analysis – PCA). Метод використовується для визначення статистично незалежних похідних ознак

об’єктів, виділення і відображення їх спектрального контрасту. При виконанні перетворення методом ГК в n-вимірному спектральному просторі осі координат спектрального простору повертаються так, щоб нові осі стали паралельні осям еліпсоїда розсіювання. PCA-перетворення конвертує взаємопов’язані мультиспектральні діапазони в новий набір некорельованих компонент

$$\begin{bmatrix} PC1 \\ PC2 \\ PC3 \end{bmatrix} = W_{PC} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \qquad (20.15)$$

де *PCi* – матриця *i-oї* ГК;
W_{pc} – матриця трансформування;
R, G, B – матриці значень яскравостей пікселів зображення у вихідних спектральних каналах.

Перша ГК "нагадує" панхроматичне (*Pan*) зображення. Тому при злитті вона також замінюється даними *Pan* з високою розрізненністю. Це зображення об’єднується з даними мультиспектральних каналів з низькою розрізненністю шляхом виконання зворотного PCA-перетворення. Схему синтезу методом ГК зображена на рис. 20.8.

Основними є такі операції: трансформація основного компонента для переведення мультиспектральних даних (з трьох і більше каналів) у розряд основних компонентів, заміна одного основного компонента, зазвичай першого, панхроматичним зображенням високого розрізнення, зворотна трансформація ГК (разом із заміненими) в режим вихідного знімка.

Після зворотної трансформації одержують кілька синтезованих мультиспектральних зображень (оскільки число вихідних каналів може бути більше трьох).

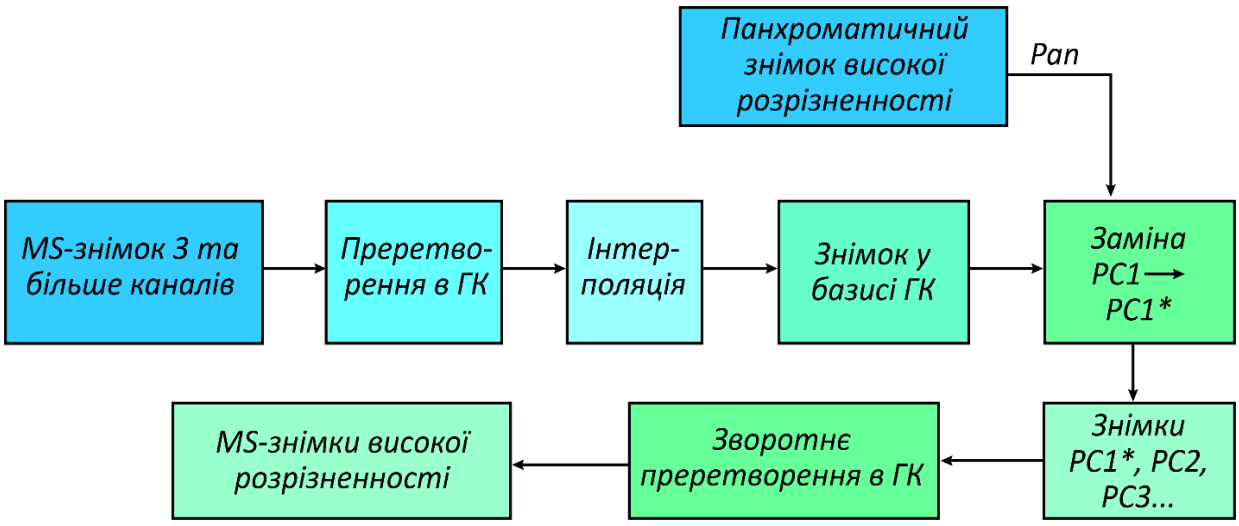


Рис. 20.8. *Схема синтезу за методом ГК*

Перетворення інтенсивність – відтінок – насиченість (Intensity – Hue – Saturation – IHS). При використанні цього методу кольорове зображення з RGB-представлення трансформується в три окремі зображення, кожне з яких має

максимальні характеристики відповідно інтенсивності (I), насиченості (S) і відтінків (H) кольорів. IHS-перетворення описується такими співвідношеннями:

$$I = R + G + B;$$

$$S = 1 - \frac{3 \cdot min(R, G, B)}{I};$$

$$H = \begin{cases} 2 - \arccos\left\{\frac{(R-G)+(R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2+(R-G)(G-B)}}\right\}, B > G \\ \arccos\left\{\frac{(R-G)+(R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2+(R-G)(G-B)}}\right\}, B < G, \end{cases} \quad (20.16)$$

де *I, H, S* – значення яскравості пікселя в каналах інтенсивність – відтінок – насиченість;

R, G, B – значення яскравості пікселя зображення у вихідних спектральних каналах.

Оскільки зображення з максимальною інтенсивністю I "схоже" на панхроматичне (*Pan*) зображення, воно замінюється при злитті Pan-зображенням з високою розрізненністю. Потім виконується зворотне IHS перетворення *Pan*-зображення спільно з зображеннями H і S, в результаті спостерігається RGB-зображення.

Схему синтезу за методом IHS зображено на рис. 20.9.

Основними є такі операції: трансформація кольорового зображення з режиму RGB в режим IHS, заміна компоненти I (інтенсивність) панхроматичним зображенням високого розрізнення, зворотна трансформація замінених компонентів з режиму IHS у вихідний режим RGB для одержання синтезованого зображення високого розрізнення.

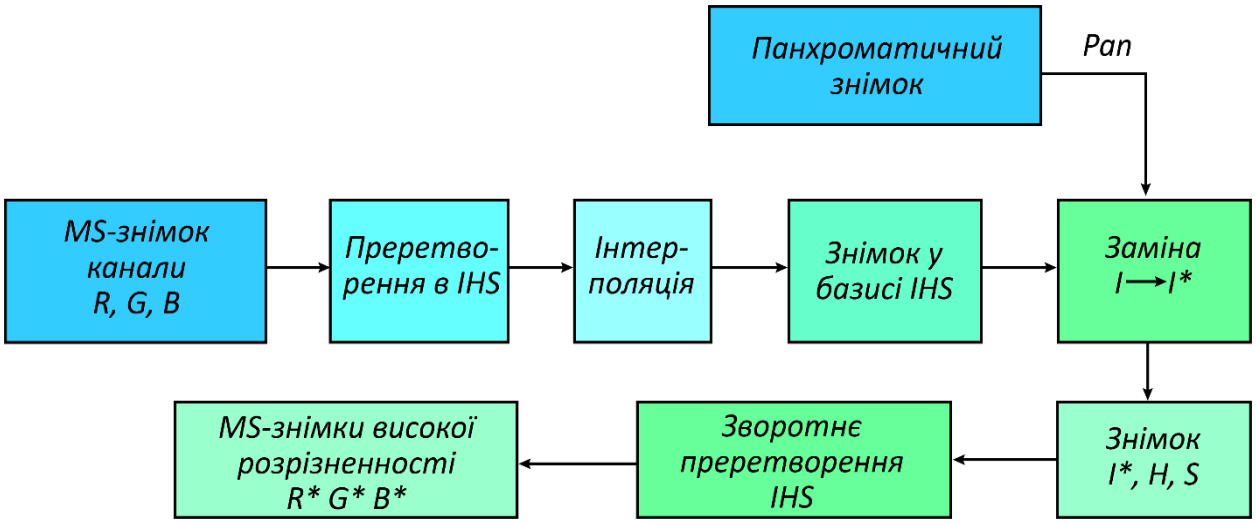


Рис. 20.9. *Схема синтеза по методом IHS*

Адитивне і мультиплікативне злиття. Для злиття зображень були розроблені різні методи, засновані на адитивних і мультиплікативних перетвореннях вихідних зображень: модуляція інтенсивності, перетворення Брови (Brovey

Transform), розрахунок комплексної змінної коефіцієнта (SVR), обчислення удосконаленого коефіцієнта (RE) тощо. При цьому, як і в вищеописаних методах, що мають за основу трансформацію базису, повинна здійснюватися процедура підвищення кількості відліків векторів даних мультиспектральних каналів *R, G, B* до рівня кількості відліків вектора даних панхроматичного зображення *P*.

Після підвищення частоти дискретизації здійснюється інтерполяція значень одержаних відліків одним із згадуваних способів. Зупинимося на двох перших методах.

Модуляція інтенсивності. Цей метод є одним із найпростіших. Він заснований тільки на візуальному сприйнятті і не стосується фізичних властивостей одержаних зображень.

Основна ідея методу полягає в помноженні панхроматичного зображення на мультиспектральне зображення низького розрізнення, знаходженні середнього геометричного і підбору дослідним шляхом коефіцієнтів масштабування і параметрів зсуву b_i для покращення візуальних характеристик.

Для трансформації застосовуються такі перетворення:

$$\begin{aligned} R^* &= a_R + b_R\sqrt{P \cdot R}, \\ G^* &= a_G + b_G\sqrt{P \cdot G}, \\ B^* &= a_B + b_{RB}\sqrt{P \cdot B}, \end{aligned} \tag{20.17}$$

Brovey-злиття. Основна процедура методу Brovey Transform полягає в тому, що спочатку кожен діапазон мультиспектрального зображення низького розрізнення множать на діапазон панхроматичного зображення з високим розрізненням, а потім кожен одержаний добуток ділиться на суму діапазонів мультиспектрального знімка. Для трансформації застосовуються такі формули:

$$\begin{aligned} R^* &= \frac{R}{(R+G+B)} \cdot P, \\ G^* &= \frac{G}{(R+G+B)} \cdot P, \\ B^* &= \frac{B}{(R+G+B)} \cdot P. \end{aligned} \tag{20.18}$$

Метод Brovey Transform був розроблений для підвищення візуального контрасту в нижніх і верхніх частинах гістограми (тобто дозволяє забезпечити контраст у тіні, на водних поверхнях і на ділянках з високою відбивною здатністю). Тому цей метод непридатний для збереження високих радіометричних характеристик вихідного зображення.

Злиття на основі фільтрації. При використанні цього методу підвищення розрізнення здійснюється за рахунок переносу високочастотних складових панхроматичного зображення на мультиспектральне зображення. Перетворення здійснюється відповідно до наступного алгоритму:

$$R^* = FT^{-1}\{LPF\{FT(R)\} + HPF\{FT(P)\}\},$$
$$G^* = FT^{-1}\{LPF\{FT(G)\} + HPF\{FT(P)\}\}, \quad (20.19)$$
$$B^* = FT^{-1}\{LPF\{FT(B)\} + HPF\{FT(P)\}\},$$

де *LPF* – low-pass filter – низькочастотна фільтрація;
HPF – hight-pass filter – високочастотна фільтрація;
FT – пряме двовимірне перетворення Фур'є;
FT^{-1} – обернене двовимірне перетворення Фур'є.

Злиття на основі внутрішньосмугових взаємодій. Перетворення Грама-Шмідта (Gram – Schmidt Trans – Schmidt Schmidt Transformation). Процедура розроблена для одержання ортогональних каналів з каналів з відомою кореляцією. Зокрема, для даних трьох каналів – *R*, *G* і *B* – з відомою кореляцією:

$$\rho_{RG} = E[R, G], \rho_{GB} = E[G, B], \rho_{RB} = E[R, B]$$

на першому кроці процедури отримують два вектори ν_G^R, ν_B^R, ортогональних R, однак корельованих між собою:

$$\begin{bmatrix} \nu_G^R \\ \nu_B^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -q_G^R & 1 & 0 \\ -q_B^R & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (20.20)$$

де $q_j^R = \rho_{Rj}\rho_{Rj}, j = G, B.$

Другим кроком слідує перетворення

$$\nu_B^G = \nu_B^R - \frac{E[\nu_B^R \nu_G^R]}{E[\nu_G^R]^2}\ \nu_G^R. \quad (20.21)$$

У результаті одержуються три ортогональні вектори R, ν_G^R, ν_B^G, один з яких заміщується даними каналу з високою розрізненністю *P*, і здійснюється зворотне перетворення.

Регресивне злиття. Внаслідок високої кореляції мультиспектрального і панхроматичного зображень метод регресивного злиття дозволяє розрахувати параметр зсуву і коефіцієнт масштабування, а потім розрахувати:

$$R^* = a_R + b_R P,$$
$$G^* = a_G + b_G P, \quad (20.21)$$
$$B^* = a_B + b_B P.$$

Відміна цього методу від методу модуляції інтенсивності полягає в тому, що параметри a_i і b_i визначаються з умов кореляції зображень, а не потрібної наочності. Цей метод не придатний для знімків ІЧ-діапазону, оскільки в даному випадку має місце слабка кореляція мультиспектрального і панхроматичного зображень.

Злиття на основі вейвлет-перетворень. Злиття зображень на основі вейвлет-перетворень (*Wavelet Transformation*) здійснюється так, як показано на рис. 20.10.

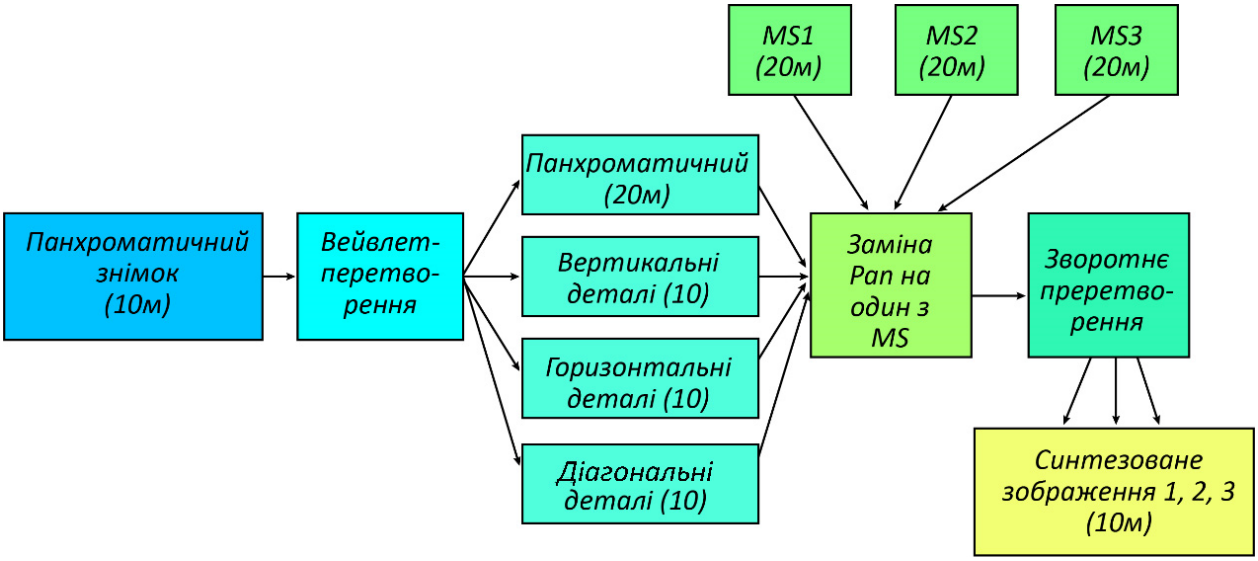


Рис. 20.10. *Схема синтезу на базі методу вейвлет-перетворення*

Панхроматичне зображення високого розрізнення розкладається на панхроматичні зображення низького розрізнення і коефіцієнти деталізації. Потім панхроматичне зображення низького розрізнення замінюється мультиспектральним зображенням з таким же розрізненням. Виконується зворотне перетворення для переведення складових і замінених частин панхроматичного зображення до вихідного рівня розрізнення панхроматичного зображення. Заміна і зворотна трансформація здійснюються тричі: по одному разу на одне мультиспектральне зображення. Таким чином, просторові деталі з високим розрізненням вводяться в кожен MS-діапазон за допомогою виконання зворотного wavelet-перетворення для кожного MS-діапазону разом з відповідними вейвлет-коефіцієнтами.

Серед усього розмаїття методів перетворення зображень найбільше розповсюдження одержали такі:

– перетворення інтенсивність – відтінок – насиченість;

– метод ГК;

– метод арифметичних комбінацій на основі перетворення Брові;

– перетворення Грама-Шмідта;

– вейвлет-перетворення.

У найбільш поширених ПК обробки даних ДЗЗ, таких як ENVI, PCI Geomatica, ERDAS , ScanEx Image Processor та інших, реалізовані різні методи злиття зображень.

У ПК ENVI 4.7 використовуються 5 алгоритмів (позначені як Transforms – Image Sharpening): IHS, Color Normalized (Brovey), Gram – Schmidt Transform, PCA і CN Spectral [105].

У базовій поставці ПК ERDAS реалізовані три різновиди таких алгоритмів: PC, Multiplicative та Brovey Transform [60].

У програмному комплексі ScanEx Image Processor реалізований алгоритм, заснований на поданні методу ГК і методу вейвлет-перетворення *(ScanEx Image Processor 3.0).*

20.5.3. Оцінка якості злиття зображень

Використання методів злиття зображень обмежується проявом на підсумковому знімку ефекту викривлення передачі кольору. Для зменшення колірних викривлень і покращення якості результатів злиття було розроблено безліч різноманітних стратегій, кожна з яких призначена для певного методу злиття або набору вихідних даних.

Проблема істотних колірних викривлень у результуючому зображенні загострилась із появою даних ДЗЗ надвисокого розрізнення. На відміну від панхроматичних зображень датчиків КА SPOT та IRS, діапазон довжин хвиль знімальних систем супутників IKONOS, QuickBird та OrbView розширений від видимого до ближньої ІЧ-зоні спектра. Ця відмінність значно змінює значення рівнів сірого таких панхроматичних зображень. Тому методи обробки, які гарно зарекомендували себе для злиття панхроматичних SPOT-зображень з іншими мультиспектральними даними, не можуть дати якісних результатів при злитті супутникових зображень надвисокого розрізнення.

При однаковому рівні розрізнення підсумкових зображень виявляється зручно оцінювати прояв ефекту порушення передачі кольору за коефіцієнтами кореляції між оброблюваними каналами. Суть методики полягає в підрахунку коефіцієнтів кореляції між мультиспектральними зображеннями до і після проведення процедури злиття.

Обчислення коефіцієнта кореляції здійснюється за формулою:

$$\rho_{x_{b1},x_{b2}}, x_{b1} = \frac{cov(x_{b1}(n),x_{b2}(n))}{\sqrt{D[x_{b1}(n)]\times D[x_{b2}(n)]}}, \qquad (20.23)$$

де $x_{b1}(n)$, $x_{b2}(n)$ – значення яскравості пікселя в точці n для зображень, одержаних в частотних діапазонах b_1 і b_2;
cov[·] – процедура знаходження коваріації двох випадкових величин;
D[·] – дисперсія випадкової величини.

Результати аналізу [73] свідчать про те, що при проведенні процедури злиття зображень коефіцієнт кореляції між підсумковими мультиспектральними і панхроматичним зображеннями виявляється більше, ніж той же коефіцієнт для вихідних зображень. Збільшення коефіцієнта кореляції пояснюється введенням у мультиспектральні канали інформації панхроматичного зображення. Це призводить до втрати частини колірної інформації та зменшення кольоровості підсумкового зображення.

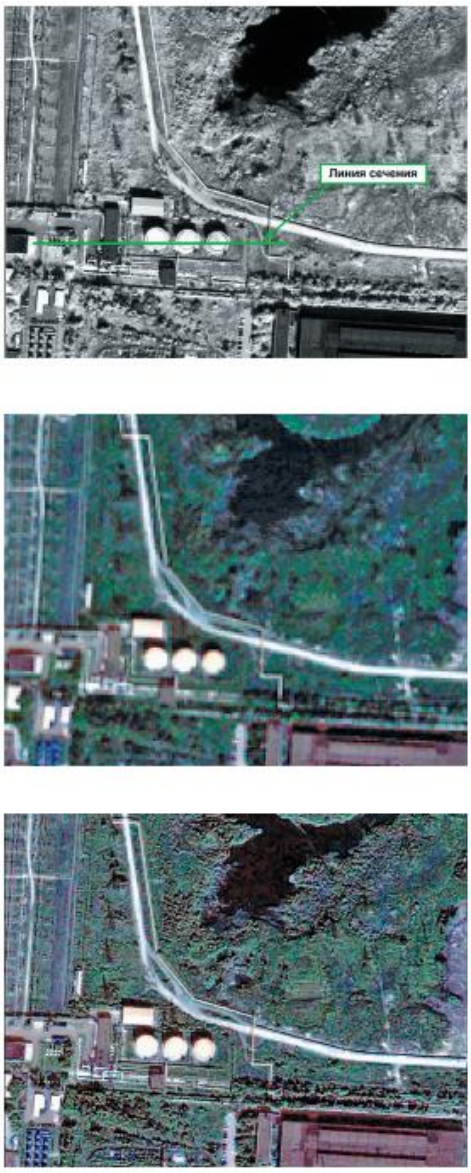
При оцінці кореляційного коефіцієнта для аналізу ефекту порушення передачі кольору вдалось виявити, що цей коефіцієнт асимптотично прямує до 1 при збільшенні різниці між масштабами вихідних панхроматичного і мультиспектральних зображень.

Приріст кореляційного коефіцієнта, обумовлений внесенням потужності панхроматичного зображення, напряму залежить від масштабу вихідного мультиспектрального зображення.

У результаті аналізу вдалось виявити, що для будь-яких алгоритмів метод злиття стає непридатним при використанні вихідних MS-зображень з масштабом більш ніж у 16 разів гірше панхроматичного.

20.5.4. Аналіз супутникових знімків

Як приклад використання описаних алгоритмів наведемо результати злиття зображень промислової зони, одержаних у панхроматичному і трьох спектрозональних каналах (рис. 20.11).



а)

б)

в)

Рис. 20.11. *Фрагмент космічного знімка:*
а) панхроматичний канал; б) кольорове зображення;
в) кольорове зображення, синтезоване методом Brovey

Для оцінки розрізнення знімків до і після процедури обробки представлені перетини зображення вздовж прямої, що перетинає зображення будівель, доріг і технічних споруд різних розмірів (рис. 20.12).

У результаті обробки реальних зображень було встановлено [73], що всі наведені методи, підвищуючи просторове розрізнення, в більшому або меншому ступені вносять викривлення передачі кольору. Найменшим викривленням володіють методи IHS-злиття, Color Normalized (Brovey) і методи на основі вейвлет-перетворення.

Обробка зображення за допомогою методу Color Normalized (Brovey) дозволила отримати зображення, найбільш наближене до вихідних MS-зображень, що виділяє цей метод на фоні інших за потреби розв'язку задач кластеризації. Незважаючи на те, що метод Color Normalized (Brovey) продемонстрував найкращі показники, потрібно зазначити, що результати обробки суттєво залежать від поєднання каналів синтезування, а значить, досвід оператора буде відігравати найбільшу роль при роботі з цим методом.

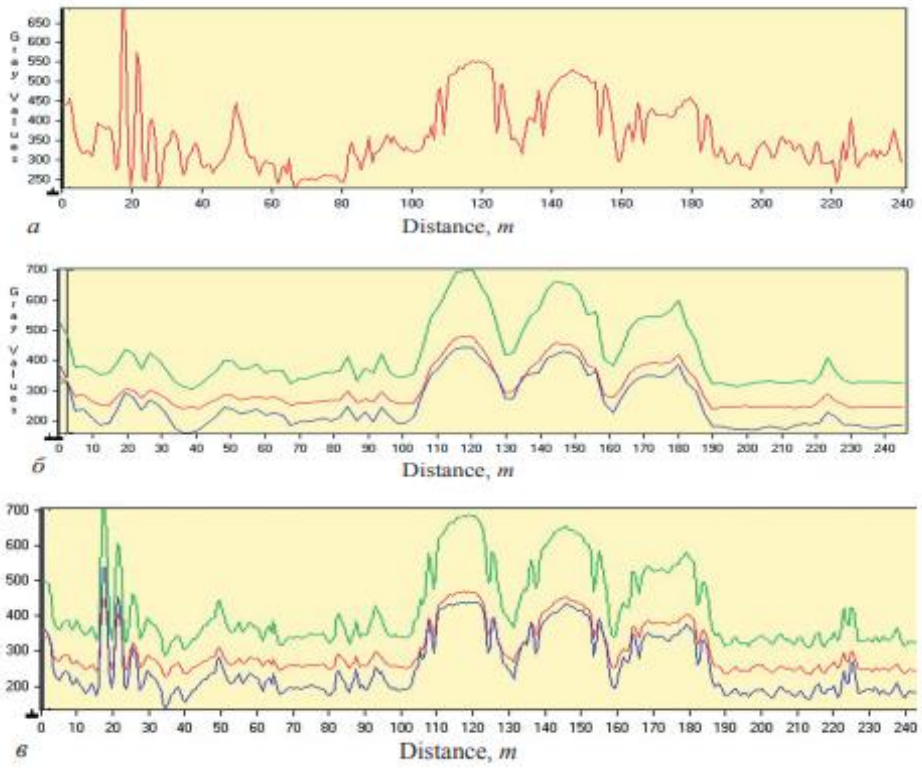


Рис. 20.12. *Перетини:*
а) панхроматичне зображення (розрізнення 0,61 м);
б – зображення червоного, синього і зеленого каналів (розрізнення 2,4 м);
в) кольорове зображення після процедури злиття

При обробці зображень з використанням методів Грама-Шмідта і ГК було встановлено, що хоча ці методи і не приводять до переходу пікселів зображення з класу в клас до і після обробки, однак у низці випадків після обробки спостерігається певна відмінність у кольорі для пікселів, які до обробки в кольорі не розрізнялись.

Для синтезування з використанням методу ГК потрібно зазначити, що зображення, одержані за допомогою цього методу, як правило, володіють слабкими кольорами і несуть значно менше колірної інформації порівняно з вихідними MS-знімками. Це пов'язано з тим, що панхроматичним зображенням замінюються ГК, яка володіє найбільшою інформацією і, отже, підсумкове зображення переважає своїми характеристиками панхроматичний знімок.

У результаті досліджень було встановлено, що незалежно від методу, обраного на першому етапі Image Fusion, спостерігається порушення передачі кольору підсумкового зображення. Ці викривлення при розв'язанні багатьох задач можуть бути залишені без уваги, а там, де передача кольору відіграє істотну роль, необхідне використання додаткових алгоритмів обробки. Незважаючи на виявлені недоліки, метод Image Fusion є гнучким і зручним інструментом тематичного дешифрування зображень.

20.6. Фрактальний аналіз космічних зображень

20.6.1. Фрактальна розмірність зображення

Одним із завдань аналізу космічних зображень, одержуваних у різних системах ДЗЗ, є виділення меж слабоконтрастних зон на зображеннях природних текстур.

Перспективні методи розв'язання подібного роду задач інтенсивно розвиваються в рамках нового напряму в теорії детермінованого хаосу – теорії фракталів в додатку до радіофізики і радіолокації [43].

Застосування методів теорії детермінованого хаосу передбачає використання моделі зображення, що враховує самоподобу природних текстур у різних масштабах. Результати обробки зображень, отриманих на різних довжинах хвиль в різних масштабах, свідчить про те, що зони зображень, що відноситься до різних класів природних утворень, зберігають свої стохастичні характеристики при зміні масштабу зображення і можуть бути досліджені з використанням теорії фракталів.

Використання фрактальних методів обробки космічних спектрозональних і радіолокаційних зображень (побудови поля фрактальних розмірностей) дозволяє розділити різні типи природних і антропогенних структур та об'єктів, таких як межі "море – льоди" на відкритих акваторіях при доволі розвиненому хвилюванні, границі берегової лінії в зонах піщаних мілин, лісові масиви, сільськогосподарські угіддя з різними культурами, що знаходяться на різних стадіях вегетації, а також факторів, що пройшли різну сільськогосподарську обробку, або такі, що були піддані впливу різних гідрометеорологічних факторів [16].

Особливістю фрактальних методів є те, що при обробці MS- та радіолокаційних зображень (РЛЗ) місцевості вдається описати унікальність спостережуваного об'єкта за допомогою одного параметра, що дає можливість здійснити попереднє автоматичне сегментування аналізованого зображення шляхом виділення кластерів заданого діапазону значень фрактальних розмірностей.

Для РЛЗ, одержаних на довжині хвилі λ, можна ввести функцію, що характеризує площу *S* (λ) зображеної на них поверхні:

$$S(\lambda) = k\lambda^{-D}, \tag{20.24}$$

де *k* − коефіцієнт масштабування, а дробовий параметр *D* називається розмірністю Хаусдорфа − Безиковича, або фрактальна розмірністю.

При обробці даних ДЗЗ можна перейти від формули (20.24) до універсальної формули обчислення фрактальної розмірності для будь-яких зображень. При цьому першим кроком виміру виступає масштаб вихідного зображення δ:

$$S(\delta) = C\delta^{-D}, \tag{20.25}$$

де *C* − деяка константа.

Даний підхід дозволяє здійснювати підрахунок фрактальної розмірності для будь-яких різномасштабних зображень, а не тільки радіолокаційних, а фрактальну розмірність оцінювати так:

$$D = -\frac{lgS(\delta)}{lg\delta} + \frac{lgC}{lg\delta}. \tag{20.26}$$

Вихідне зображення місцевості можна описати матрицею I розміром m строк на n стовпців. Функція *I(i,j)* в цьому випадку є цифровим зображенням місцевості, де $0 \le I(i,j) \le I_{max}$ при $0 \le i \le m-1$ і $0 \le o \le n-1$ визначає значень яскравості в точці (i,j). Для об'єктів, що мають простий геометричний вид, фрактальна розмірність дорівнює топологічній, тобто набуває цілочисельних значення. Значення фрактальної розмірності складних об'єктів є дробовими і лежать у діапазоні від двох ($I(i,j) = 0, \forall i,j$) – топологічна розмірність площі до трьох ($I(i,j) = const \neq 0, \forall i,j$)) – топологічна розмірність об'єму. Фрактальна розмірність *D* більшості зображень реальних покровів і метереологічних утворень більша від топологічної розмірності D_0 і характеризує ступінь заповнення простору, в яких існує фрактальна система.

На практиці фрактальна розмірність оцінюється за нахилом графіка $lgS(\delta) = lgC - Dlg\delta$. При визначенні значення *D* за двома точками невідомі *C* і *D* визначаються з системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \lg(S(\delta_1)) &= lgC - Dlg\delta_1, \\ \lg(S(\delta_2)) &= lgC - Dlg. \end{aligned} \tag{20.27}$$

Результатом обробки зображення є побудова поля фрактальної розмірності, при якому кожному пікселю зображення ставиться у відповідність значення *D*. Підрахунок фрактальної розмірності здійснюється в ковзному вікні або у вікні *K*, що стрибає розміром *k*×*k* з кроком *s* = 1 для ковзного і *s* >1 для вікна, що стрибає, за допомогою якого здійснюється сканування вихідного зображення, а потім одному з пікселів зображення, що належить вікну сканування, ставиться у відповідність

одержане значення фрактальної розмірності. Зазвичай цим пікселем є точка, рівновіддалена від усіх границь вікна сканування, в цьому випадку *k* є непарним числом.

20.6.2. Методи розрахунку фрактальної розмірності

У практичних задачах обробки зображень, одержаних у системах ДЗЗ, розрахунок фрактальної розмірності найчастіше здійснюється на основі визначення показника Херста, застосування локально-дисперсійного методу, методів покриття, призми та низки інших. Однак навіть при обробці одного зображення різними методами результати найчастіше різняться один від одного. При розрахунку фрактальної розмірності на практиці потрібно обирати відповідний алгоритм з міркувань обчислювальної точності, швидкості і системних ресурсів.

Метод покриття. Визначення розмірності даним методом передбачає застосування таких процедур.

Обирається деякий куб зі стороною ε, потім ним покривається тривимірне подання зображення (множина *I*). Нехай *N*(ε) – мінімальна кількість кубів із стороною ε, необхідних для покриття множини *I*. Тоді можна ввести поняття міри досліджуваної текстури:

$$\mu_D(I) = N(\varepsilon)\varepsilon^D. \tag{20.28}$$

Нехай міра для деякої константи $C > 0$, тоді міра перетворюється до виду

$$N(\varepsilon) \approx \frac{\mathrm{C}}{\varepsilon^D},$$

або

$$lg(N(\varepsilon)) = lg(C) - Dlg(\varepsilon). \tag{20.29}$$

Звідси одержуємо:

$$D = -\frac{\lg\big(N(\varepsilon)\big)}{\lg(\varepsilon)} + \frac{\lg(C)}{\lg(\varepsilon)}.$$

Оскільки $\lg(\varepsilon) \to -\infty$ при $\varepsilon \to 0$, то фрактальна розмірність визначається як

$$D = -\lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\lg\big(N(\varepsilon)\big)}{\lg(1/\varepsilon)}. \tag{20.30}$$

З формули (20.29) видно, що графік залежності *lg(N(ε))* від *lg(ε)* є прямою лінією з кутовим коефіцієнтом *D*.

Локально-дисперсійний метод. При використанні локально-дисперсійного методу значення фрактальної розмірності визначається шляхом обчислення дисперсії інтенсивності (яскравості) в декількох масштабах.

Для цього формується набір $I(i,j)$ з *P*-ї кількості зображень різного масштабу δ_p, де $p \in [1, P]$, одного q того ж досліджуваного фрагмента шляхом

лінійного віконного згладжування, тобто рамочної фільтрації вихідного знімка *I* в зображення *I'*. Значення елементів $I'(i',j')$, що утворюються при рамочній фільтрації вікном розміром *(2M+1)x(2N+1)*, будуть визначатись таким виразом:

$$I \to I' : I'(i',j')\Big|_{\forall ij} = \frac{1}{(2M+1)(2N+1)} \sum_{i=i'-M}^{i'+M} \sum_{j=j'-N}^{j'+N} I(i,j). \tag{20.31}$$

Потім з використанням вікна сканування *K* розміром *k*×*k* здійснюється підрахунок середньоквадратичних відхилень σ_2 значення яскравості у вікні $I_p(i,j)$, де $i,j \epsilon K$, для різних масштабів δ_p. За нахилом графіка $lg\sigma_p^2(lg\delta_p)$ знаходиться значення фрактальної розмірності у вікні. При використанні двох вимірів дисперсії інтенсивності фрактальна розмірність обчислюється за формулою

$$D \approx \frac{ln\sigma_2^2 - ln\sigma_1^2}{ln\delta_2 - ln\delta_1}, \tag{20.32}$$

де σ_1, σ_2 – середньоквадратичне відхилення на першому δ_1 і другому δ_2 масштабах зображення відповідно.

При великій кількості вимірів використовується метод найменших квадратів.

Метод призми. При розрахунку фрактальної розмірності методом призми обирається вимірювальне вікно розміром $k_0 \times k_0$. Вершини квадрата, що описує вимірювальне вікно, позначимо *a, b, c, d*.

Вимірювальне вікно розбивається на два трикутники. Вершини цих трикутників позначені на рис. 20.11 так:

$(i_a, j_a, I(i_a, j_a)), (i_b, j_b, I(i_b, j_b)), (i_d, j_d, I(i_d, j_d))$, – для першого і
$(i_b, j_b, I(i_b, j_b)), (i_c, j_c, I(i_c, j_c)), (i_d, j_d, I(i_d, j_d))$ – для другого.

Потім за відомими формулами, наприклад Герона, обчислюються площі одержаних трикутників $S_{\Delta abd}$ і $S_{\Delta bcd}$. Площа поверхні побудованої призми для значення k_0 знаходять за формулою:

$$S_{k_0} = S_{\Delta abd} + S_{\Delta bcd}. \tag{20.33}$$

Потім вікно $k_0 \times k_0$ розбивають на *n* кількість субвікон S_{k1}^i, і для кожного з них знаходять значення $S_{k_1} = \sum_{i=1}^{n} S_{k1}^i$, а потім загальне значення.

В підсумку після *j*-ї ітерації будується залежність:

$$S_{k_j} = \sum_{i=1}^{n} (S_{\Delta abc} + S_{\Delta acd})_{k_j}^i. \tag{20.34}$$

За нахилом графіка обчислюється значення фрактальної розмірності. При побудові поля фрактальної розмірності вікно сканування розміром *k*×*k* на першому кроці обчислення фрактальної розмірності встановлюється вимірювальним вікном розміром $k_0 \times k_0$, а потім здійснюється його розбивка на субвікна.

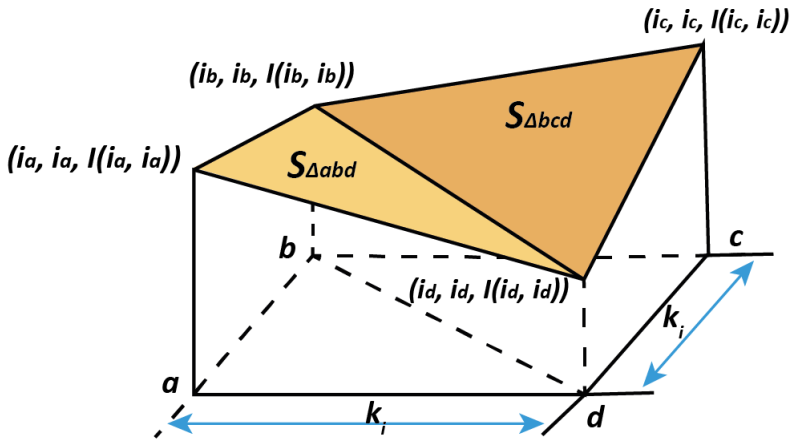


Рис. 20.11. *Побудова призми за чотирма точками зображення*

Модифікований алгоритм побудови поля фрактальної розмірності локально-дисперсійним методом. При підрахунку фрактальної розмірності потрібно визначити поведінку досліджуваної текстури на різних масштабах. При використанні класичного локально-дисперсійного методу різномасштабні фрагменти одержують з вихідного зображення лінійним віконним згладжуванням.

В модифікації локально-дисперсійного методу набір різномасштабних зображень формується на основі вейвлет-перетворення вихідного знімка [73].

При подібному підході порядок вейвлет-перетворення виступає в ролі вимірювальної лінійки, яка визначає поведінку досліджуваної текстури на різних масштабах.

Алгоритм швидкого вейвлет-перетворення визначає процес представлення сигналу у вигляді сукупності наближень грубої $Am(t)$ і уточненої $Dm(t)$ складових. При цьому потрібно зазначити, що тільки для одного типу вейвлетів – вейвлетів Хаара – груба $Am(t)$ складова сигналу є зменшеною в m разів копією вихідного сигналу $S(t)$ і в 2 рази меншою копією $A_{m-1}(t)$. З цього випливає, що можна використовувати $A_m(t)$ і $A_{m-1}(t)$ як набір різномасштабних сигналів для одержання значень фрактальної розмірності.

Для двовимірного вейвлет-перетворення вихідне зображення буде представлено наступною сумою:

$$A_{m-1,m-1} = A_{mm} + D_{m-1,m} + D_{m,m-1} + D_{mm}, \qquad (20.35)$$

де $A_{m-1,\,m-1}$ – вихідне зображення;
A_{mm} – зменшена в 2 рази копія вихідного зображення;
$D_{m-1,m}$ – коефіцієнти деталізації по горизонталі;
$D_{m,m-1}$ – коефіцієнти деталізації по вертикалі;
D_{mm} – коефіцієнти деталізації по діагоналі.

Згідно з класичним локально-дисперсійним методом значення фрактальної розмірності обчислюється відповідно до виразу (20.32). Отже, значення фрактальної розмірності при використанні вейвлет-перетворення із застосуванням вейвлетів Хаара можна обчислити так:

$$D = log_{\frac{m-1}{m}} \frac{\sigma^2[A_{m,m}]}{\sigma^2[A_{m-1,m-1}]}. \quad (20.36)$$

З виразів (20.35) і (20.36) отримаємо:

$$D = log_{\frac{m-1}{m}} \frac{\sigma^2[A_{m-1,m-1} - (D_{m-1,m} + D_{m,m-1} + D_{mm}]}{\sigma^2[A_{m-1,m-1}]}. \quad (20.37)$$

При використанні модифікованого алгоритму підрахунок дисперсії яскравості здійснюється в ковзному вікні, потім здійснюється пряме вейвлет-перетворення фрагмента зображення, яке визначається вікном обробки з використанням вейвлетів Хаара, а потім зворотне з видаленням коефіцієнтів деталізації. Формується набір на різних масштабах δ_p. Перший масштаб визначається вихідним зображенням, а наступні – зображеннями, загубленими за допомогою вейвлет-перетворення.

Обробка зображення локально-дисперсійним методом здійснюється шляхом послідовної реалізації таких етапів:

– обчисленням дисперсії у ковзному вікні і прив'язкою одержаного значення до кожного пікселя вихідного зображення;

– прямим вейвлет-перетворенням досліджуваного вікна зображення, різність масштабів забезпечується глибиною вейвлет-перетворення;

– зворотним вейвлет-перетворенням оброблюваного фрагмента зображення з видаленням коефіцієнтів деталізації;

– обчисленням дисперсії у ковзному вікні одержаного зображення;

– обчисленням фрактальної розмірності локально-дисперсійним методом.

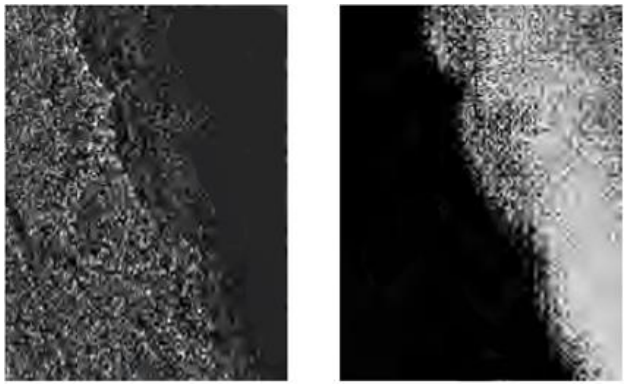
Підрахунок фрактальної розмірності даним методом можливий тільки для зображень, в яких присутня випадкова складова. Ця умова пояснюється тим, що розрахунок дисперсії яскравості здійснюється у ковзному вікні K, і якщо в цьому вікні $I(i,j) = const$, для всіх $i,j \in K$, то $\sigma^2 = 0$, а $ln\sigma^2 = -\infty$. Таким чином, даний метод не передбачає можливості підрахунку фрактальної розмірності для граничних випадків $D = 2$ і $D = 3$, однак простота реалізації забезпечує високу продуктивність і швидкий розрахунок. Потрібно зазначити, що подібне застереження в силу її природи характерне і для класичного локально-дисперсійного методу.

20.6.3. Приклади фрактальної обробки супутникових знімків

Для порівняння алгоритмів розрахунку фрактальної розмірності наведемо результати обробки мультиспектральних, панхроматичних і радіолокаційних зображень, одержаних у праці [73]. На рис. 20.12, *б* наведено результати обробки вікном розміром 11×11 РЛЗ, одержаного за допомогою радіолокатора із синтезованою апертурою супутника "Алмаз-1", яке містить зображення межі "берег – море".

На основі обробки даних побудовано поля фрактальних розмірностей природних об'єктів у градаціях яскравості від 0 до 255 двома методами. Значенню

яскравості 0 присвоєна мінімальну розмірність, значенню яскравості 255 – максимальну.



а) *б)*

Рис. 20.12. *Фрактальна обробка космічного РЛЗ:*
а) вихідне зображення; б) поле фрактальної розмірності

На рис. 20.13 подано гістограму значень поля фрактальних розмірностей вихідного зображення.

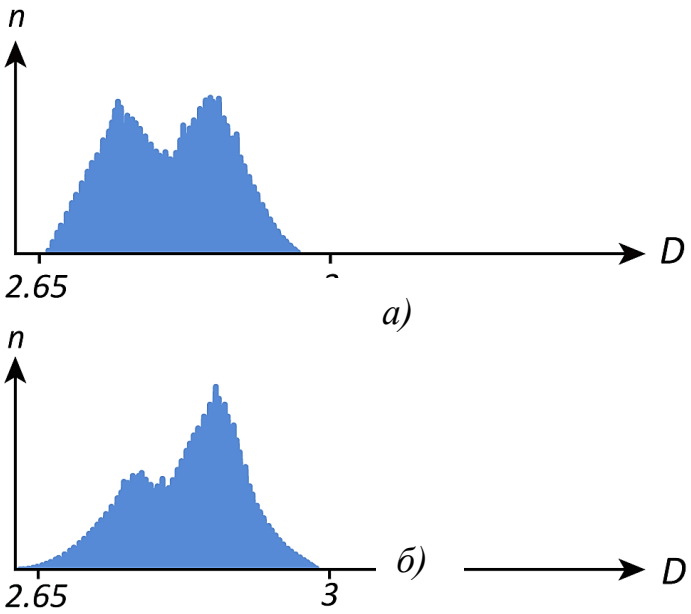


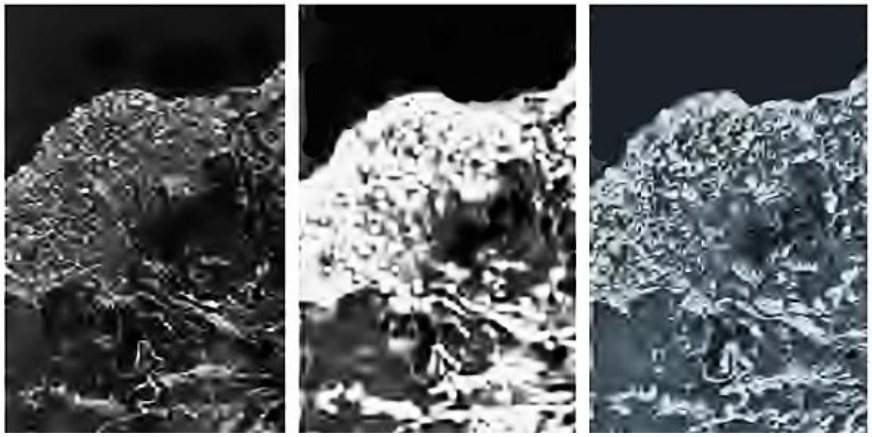
Рис. 20.13. *Гістограми розподілу значень фрактальної розмірності:*
а) модифікований локально-дисперсійний метод; б) метод призми

На ній по осі *X* відкладено величину фрактальної розмірності, а по *Y* – кількість пікселів, відповідно до значення фрактальної розмірності. Аналіз гістограми свідчить, що на зображенні присутні два типи підстильних поверхонь (два піки на рис. 20.13, *а* – при $D = 2{,}8$ і $D = 2{,}9$), що відповідає суші і морській поверхні. В той же час поверхні малої площі (мілини, канали, прибережні зони) на гістограмі не розрізняються через їх малу питому вагу в загальному числі фрактальних

розмірностей. При проведенні порогової обробки на результуючому зображенні (рис. 20.12, *б*) межа "суша – море" стає виразною.

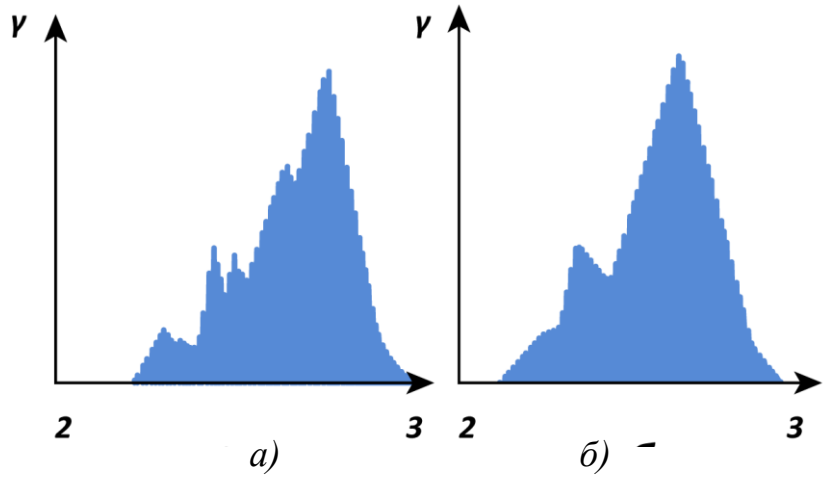
Для порівняння результатів обробки різними методами виконаємо аналіз обробки фрагмента мультиспектрального знімка, наведеного на рис. 20.14, *а*.

На рис. 20.14, *б, в* подано результати розрахунку фрактальної розмірності вихідного фрагмента двома методами при однаковому розмірі вікна обробки – 11×11, а на рис. 20.15 – гістограми і подальша порогова обробка з метою візуального розподілу на класи (метод призми – 6 класів; модифікований локально-дисперсійний метод – 5 класів).



а) *б)* *в)*

Рис. 20.14. *Фрактальна обробка фрагмента мультиспектрального знімка: а) вихідне зображення; б) метод призми; в) модифікований локально-дисперсійний метод*



а) *б)*

Рис. 20.15. *Гістограми розподілу значений фрактальної розмірності: а) метод призми; б) модифікований локально-дисперсійний метод*

Гістограма розподілу фрактальної розмірності при підрахунку за методом призми має безліч піків і западин (рис. 20.15, *а*), що дозволяє виділити більше число класів, ніж при використанні модифікованого локально-дисперсійного методу (рис. 20.15, *б*).

Вплив розмірів вікна обробки. Збільшення вікна обробки приводить до згладжування поля фрактальної розмірності, невеличкі неоднорідності на зображенні не виділяються, однак загальний характер поля не змінюється. Це відбувається через те що кожному елементу підсумкового зображення ставиться у відповідність значення поля фрактальної розмірності, одержане у вікні обробки, в результаті розрізнення поля фрактальної розмірності визначається розміром даного вікна. На одержаному зображенні це призводить до розмиву меж однорідних ділянок і досліджуваних об'єктів. В той же час при зменшенні вікна аналіз поля фрактальної розмірності стає ускладненим. Це обумовлено тим, що при великому зображенні (понад 200×200 пікселів) невеличкі кластери фрактальної розмірності затінюють загальний характер зображення. Тому при аналізі таких зображень доцільно використовувати вікна розміром $k \geq 9$.

Аналіз полів значень фрактальних розмірностей D для однотипних сцен, одержаних різними знімальними системами, наведено в [73].

На рис. 20.12, *б* наведені результати обробки вікном розміром 11×11 РЛЗ, на підставі обробки фрагментів мультиспектральних, панхроматичних та радіолокаційних знімків ділянок місцевості, засвідчив, що незалежно від способу одержання вихідних зображень для кожного знімку розраховані значення фрактальної розмірності для одних і тих же класів природних текстур слабо відрізняються на космічних зображеннях, одержаних різними знімальними системами.

Так, незалежно від джерела даних вдається визначати межу "суша – море", більш того, значення фрактальної розмірності, що відповідає цій границі, при розмірі вікна обробки $k = 25$ виявляється близьким до $D = 2{,}6$.

Таким чином, безпосередній аналіз поля фрактальних розмірностей дозволяє виділяти особливості досліджуваних поверхонь.

Питання для самоконтролю

1. Що розуміють під терміном "простір ознак"?

2. У чому полягає сутність спектральних перетворень багатоканальних даних ДЗЗ?

3. Перерахуйте основні методи перетворень багатоканальних (багатозональних) даних ДЗЗ.

4. Що розуміють під терміном "вегетаційний індекс"? Як обчислюється нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI)?

5. У чому полягає сутність методу головних компонент?

6. На чому засновано перетворення "ковпак із пензлем"?

7. Які перетворення спектрального простору лежать в основі методів "злиття зображень"?

8. Що характеризує фрактальна розмірність зображення?

XXI. ОСОБЛИВОСТІ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ЗЙОМКИ В ДЗЗ

Космічна радіолокація є всепогодним засобом спостереження за поверхнею Землі. Розвиток радіолокаційної науки й техніки та інформаційних технологій створив технологічне підґрунтя для впровадження у бортові інформаційні комплекси космічних апаратів видового спостереження радіолокаторів із синтезованою апертурою антени (англ. SAR – synthetic aperture radar – синтезована апертура радара), які при використанні надширокосмугових зондувальних сигналів забезпечили субметрове просторове розрізнення радіолокаційних зображень.

Використання поляриметричних й інтерферометричних (знімання з двох різних кутів або у різний час та подальше сумісне когерентне оброблення обох прийнятих радіолокаційних сигналів) технологій наблизили інформативність радіолокаційного знімання до оптико-електронного. Це стало в останнє десятиліття причиною більш інтенсивного нарощування чисельності угруповання діючих космічних апаратів (КА) видового радіолокаційного спостереження. За рахунок застосування бокового огляду і синтезу апертури при космічній радіолокації досягається таке ж просторове розрізнення, як в оптичному діапазоні.

21.1. Принципи радіолокації

При мікрохвильовому зондуванні використовуються *активні* і *пасивні* МДЗ. У мікрохвильовий діапазон радіохвиль зазвичай включають діапазони міліметрових, сантиметрових і дециметрових хвиль, тобто мікрохвильове випромінювання характеризується довжинами хвиль від 1 мм до 1 м.

Мікрохвильове випромінювання проникає крізь хмари, туман, пил і не занадто сильні зливи, оскільки більш довгі хвилі у цьому випадку не розсіюються і поглинаються подібно світловим хвилям. Ця властивість дозволяє отримувати радіозображення за практично будь-яких погодних умов, тому дані можуть бути отримані у будь-який час.

Радіолокаційне зображення істотно відрізняється від зображень, що одержуються у видимій і інфрачервоній частині спектра. Внаслідок цього вони доповнюють один одного, і синтез цих зображень дає нові можливості для збільшення інформативності результатів дистанційного зондування.

Пасивне мікрохвильове зондування аналогічне тепловому дистанційному зондуванню в ІЧ-діапазоні. Всі тіла з температурою, відмінною від абсолютного нуля, випромінюють мікрохвилі, однак їх потужність дуже мала і для її реєстрації необхідні дуже чутливі приймачі, що називаються радіометрами. Пасивне мікрохвильове зондування (СВЧ-радіометрія) використовується в метеорології, гідрології, океанографії й інших сферах.

Активні мікрохвильові сенсори мають власне джерело мікрохвильового випромінювання, що висвітлює земну поверхню. Такий сенсор має назву

радіолокатора або *радара* (від англ. Radio Detection And Ranging – радіовиявлення і визначення дальності).

Радіолокаційне зондування володіє двома важливими властивостями порівняно з оптичними:

– всепогодністю;

– можливістю проведення зйомки у будь-який час доби.

Радіолокатор випромінює радіосигнал до об'єкта і потім приймає розсіяну у зворотному напрямку частину радіосигналу, вимірюючи його інтенсивність і час розповсюдження, визначаючи тим самим відстань до об'єкта.

Радіолокатор за своєю суттю є пристроєм, що вимірює відстань або дальність до об'єкта. Він складається з передавача, приймача, антени та електронного блока для реєстрації й обробки сигналів. Передавач генерує послідовність коротких імпульсів А (рис. 21.1) через певні часові інтервали, які фокусуються передавальною антеною в пучок В.

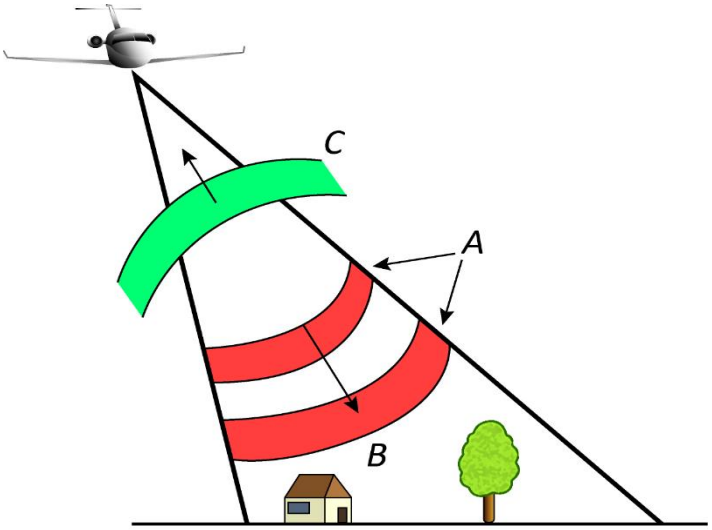


Рис. 21.1. *Принцип радіолокації*

Радіолокаційний сигнал висвітлює поверхню нахилено і під прямим кутом до руху носія. Антена приймає відбите назад випромінювання у вигляді імпульсу С від об'єктів, висвітлених падаючим пучком В. Антена є пристроєм, що перетворює електромагнітні коливання в радіочастотному діапазоні, що виробляється передавачем, на ЕМХ, які розповсюджуються від антени у навколишній простір (передавальна антена) і, навпаки, перетворює радіохвилі, що надходять до неї, на електромагнітні коливання і далі на приймач. Антени є так званими зворотними пристроями, тобто одна й та ж антена може працювати як в режимі передачі, так і в режимі прийому. Найпростішою антеною може слугувати металевий дріт.

Якщо дріт з'єднати з генератором електричних коливань, він стане випромінювати в навколишній простір ЕМХ і, навпаки, ЕМХ, що приходять, будуть індукувати в ньому електричний струм. Для ефективної роботи дріт повинен мати певні розміри і конфігурацію. Спрямованість антени, тобто її здатність концентрувати випромінювання в певному напрямку, залежить від її конструкції.

Помістивши невеличку антену-опромінювач у фокус параболічного рефлектора (відбивача), отримують гостроспрямоване випромінювання набагато більшої інтенсивності. Рефлектор у приймальної антени в сотні і тисячі разів перевищує її чутливість. Чим більший розмір рефлектора, тим більша спрямованість дії антени.

Вимірюючи час затримки між моментами передачі імпульсу і прийому луна-сигналів від різних об'єктів і знаючи швидкість розповсюдження світла в секундах, можна визначити їх відстань від радара, а потім їх місце розташування. Оскільки носій рухається вперед, у результаті реєстрації та обробки розсіяних назад сигналом будується двовимірне зображення поверхні.

Радіолокатори можуть працювати в таких мікрохвильових діапазонах, буквені назви яких історично збереглись з часів Другої світової війни: Ка, *K*, *Ки* – діапазони (довжини хвиль 0,75–2,4 см), *X*-діапазон (2,4–3,75 см), *C*-діапазон (3,75–7,5 см), *S*-діапазон (7,5–15 см), *L*-діапазон (15–30 см), *P*-діапазон (30–100 см).

21.2. Особливості радіолокаційної зйомки

Геометрія мікрохвильової зйомки відрізняється від зйомки кадровими і сканувальними системами, які зазвичай використовуються при зондуванні в оптичному діапазоні. Загальним для обох різновидів зондування є рух платформи у напрямку польоту *A* (рис. 21.2) з точкою надира *B* на земній поверхні прямо під платформою.

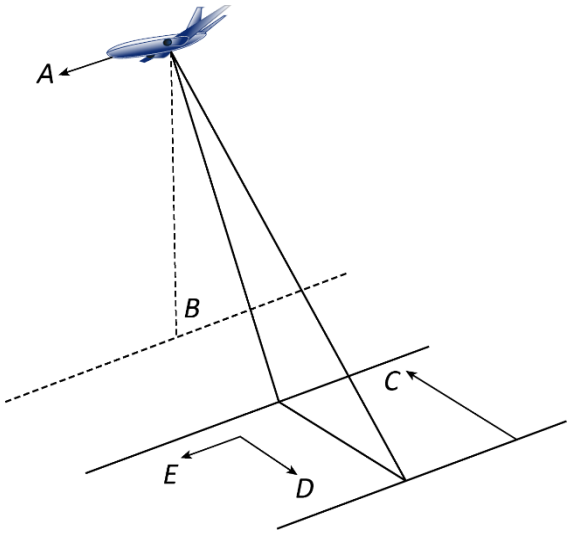


Рис. 21.2. *Геометрія бокового огляду*

Мікрохвильовий пучок радіохвиль випромінюється нахилено під прямим кутом до напрямку руху, висвітлюючи смугу з шириною *C*, яка віддалена від точки надира. Буквою *D* показаний поперечний до лінії польоту напрямок, вздовж якого на поверхні Землі відраховується координата "дальність".

Азимут *E* є координатою, що відраховується вздовж лінії, паралельної до напрямку польоту. Така геометрія бокового огляду є типовою для отримання зображення земної поверхні при мікрохвильовому зондуванні, а самі радіолокатори називаються *радіолокаторами бокового огляду*.

Принцип бокового огляду передбачає нахилений (20–60°) напрямок зондувальних сигналів перпендикулярно прямолінійній траєкторії руху. Внаслідок поступального переміщення носія радіолокатор виконує зйомку місцевості в смузі огляду, паралельній лінії польоту. Оскільки об'єкти місцевості знаходяться на різних відстанях від носія (мають різні нахилені дальності), то відбиті від них радіосигнали надходять у приймач у різний час. Оскільки радіолокаційне зображення формується шляхом реєстрації нахилених дуальностей до об'єкта, то зйомку безпосередньо під носієм, де дальності відрізняються дуже мало, не виконують, а встановлюють ближню межу смуги зйомки на відстані близько третини висоти польоту. Просторове розрізнення радіолокаційних знімків уздовж лінії польоту залежить від ширини діаграми спрямованості, тобто від геометричної ширини зондувального імпульсу, а вздовж рядка – від його тривалості.

Визначальним є розрізнення знімків вздовж лінії польоту, яке тим краще, чим довша антена.

Відстань від точки надира до ближньої межі смуги називається *ближньою дальністю*, відстань до дальньої межі зображення називається *граничною дальністю* (рис. 21.3).

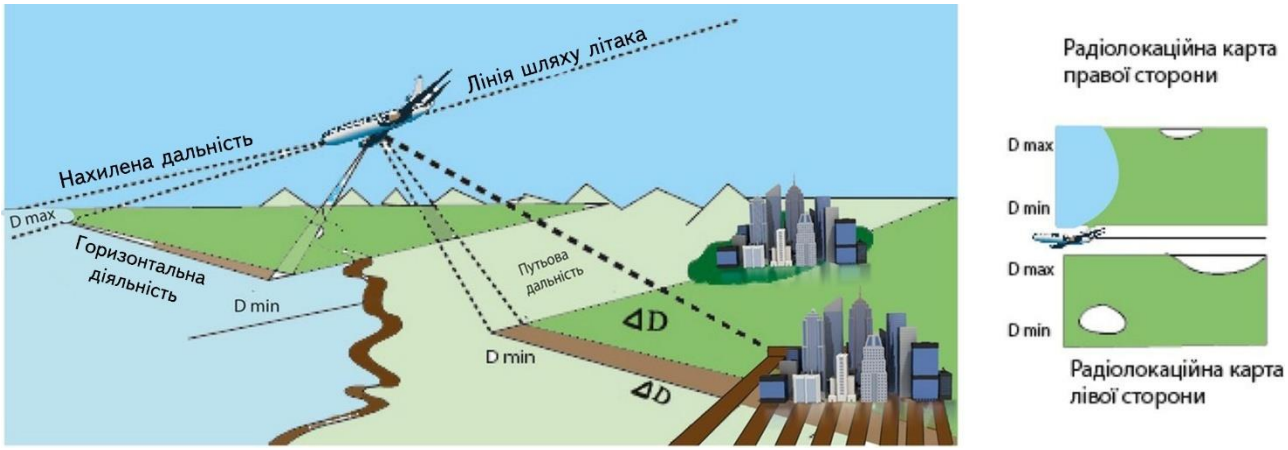


Рис. 21.3. *Визначення дальності*

Кут падіння хвилі *A* (рис. 21.4) – це кут між радіопроменем і перпендикуляром до земної поверхні, який збільшується у міру руху упоперек смуги спостереження від ближньої дальності і граничної дальності. На рис. 21.4 через *B* позначено кут огляду – кут, під яким радар "бачить" поверхню. Радіолокатор вимірює відстань від антени до кожного елемента поверхні. Ця відстань *C* (рис. 21.4) називається нахиленою дальністю, в той час, як зазначалось вище, дальність D – це горизонтальна відстань вздовж земної поверхні від точки надира до розглядуваного елемента земної поверхні.

На відміну від оптичних систем, просторове розрізнення радіолокаторів залежить від особливостей мікрохвильового випромінювання і геометричних ефектів. Радіолокатори з дійсною (реальною) апертурою (апертура – розкрив, розмір розкриву антени) використовуються як радіолокатори бокового огляду для формування радіолокаційного зображення.

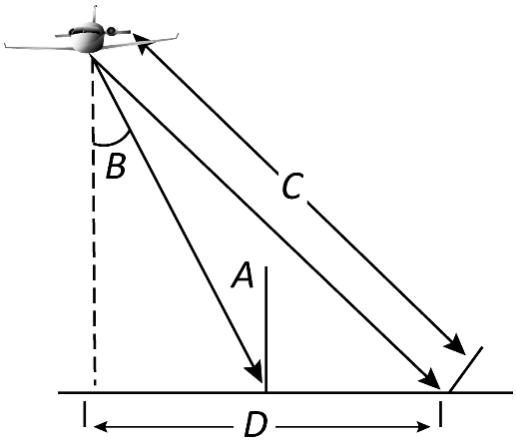


Рис. 21.4. *Кути огляду і падіння, нахилена дальність*

Розрізненність цих радарів залежить від тривалості імпульсу і розміру освітлювальної зони в азимутальному напрямку. Розрізненність за дальністю або розрізнення упоперек траєкторії залежить від тривалості імпульсу.

Розрізненність уздовж променя не залежить від значення нахиленої дальності. На земній поверхні розрізнення за дальністю зменшується у міру зростання дальності. Розрізнення за азимутальною координатою або розрізнення вздовж траєкторії руху визначається кутовою шириною випромінюваного пучка радіохвиль і нахиленою дальністю. При збільшенні дальності розрізнення погіршується. Ширина пучка радіохвиль або ширина пучка діаграми спрямованості антени зворотно пропорційна розміру антени і прямо пропорційна довжині хвиль, тобто чим більший розмір апертури і коротша довжина хвилі, тим вужча діаграма спрямованості і краще розрізнення. Покращення розрізненності може бути досягнуто використанням більш коротких імпульсів, однак на цьому шляху існують технічні обмеження. Розрізненність за азимутом можна збільшити за допомогою антени великих розмірів, але граничні розміри тут обмежені можливостями і розмірами самих повітряних або космічних носіїв. Зазвичай РБО знімають одночасно дві смуги огляду (рис. 21.5).

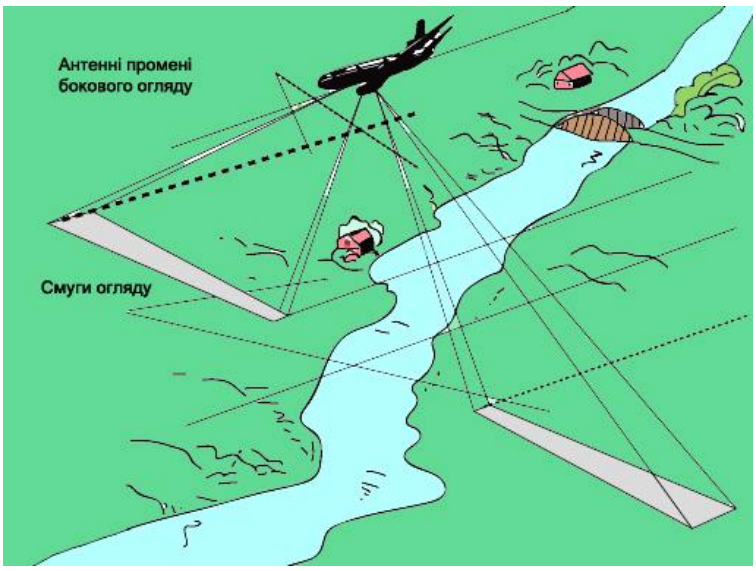


Рис. 21.5. *Двосмугова зйомка радіолокатором бокового огляду*

Для усунення обмеження по довжині антени і збільшення розрізнення в сучасних РБО використовується спеціальна реєстрація та обробка відбитих радіосигналів. На рис. 21.6, показано, як це відбувається. Відбиті сигнали від об'єкта А реєструються при різних положеннях платформи, причому запам'ятовуються і амплітуда, і фаза випроміненого та відбитого сигналів. Фізично це еквівалентно тому, що об'єкт висвітлюється антеною довжини *B* (синтезована антена). Відмінності лише в тому, що висвітлення об'єкта і реєстрація відбитого сигналу елементами синтезованої антени відбувається не одночасно, а послідовно.

Об'єкти, що розташовані на великих відстанях, висвітлюються довше, що забезпечує незалежність розрізненності від відстані. За результатами зйомки, виконаної за допомогою реальної короткої антени, вдається сформувати радіолокаційний знімок, який отриманий начебто за допомогою довгої антени (штучно сформованої) з відповідно вузькою діаграмою спрямованості (рис. 21.6, *б*).

Високе розрізнення (від 30–10 м до декількох метрів у найкращих радіолокаторів) досягається шляхом комп'ютерної обробки відбитих сигналів, які, як уже зазначалось, приймаються і накопичуються у міру руху носія.

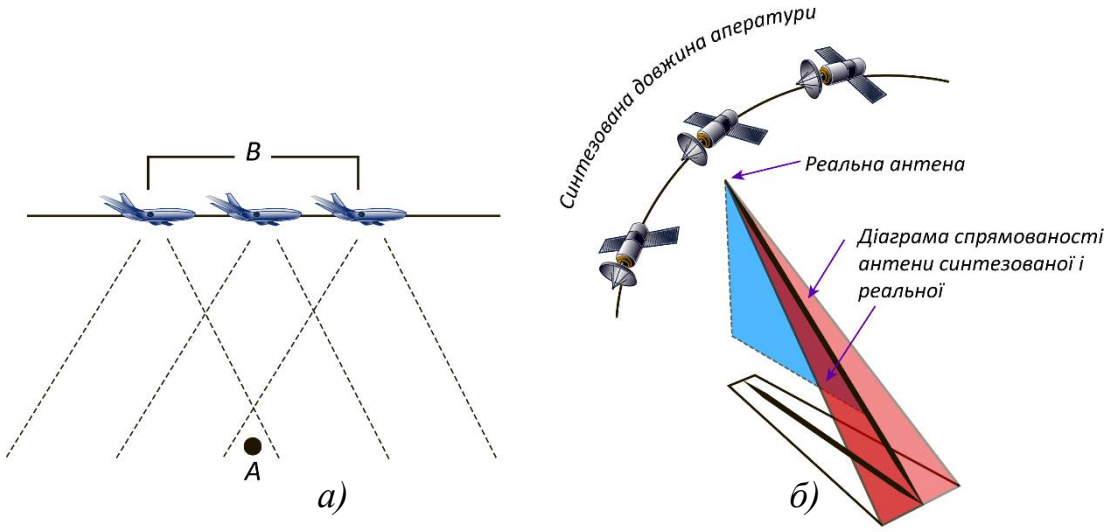


Рис. 21.6. *Принцип роботи радіолокатора із синтезованою апертурою*

Радіолокатори, що використовують такий метод одержання зображення з високою розрізненністю, постійній по всій смузі огляду, називаються *радіолокаторами із синтезованою апертурою* (РСА). В зарубіжній літературі вони називаються synthetic aperture radar (SAR). Більшість сучасних радарів, що використовуються для дистанційного зондування, відносяться до цього класу.

21.3. Викривлення радіолокаційних зображень

Подібно до всіх систем дистанційного зондування, радіолокаційне зондування має певні геометричні викривлення. Ці викривлення мають свої особливості внаслідок принципу бокового огляду і того факту, що радіолокаційний метод заснований на принципі виміру відстаней.

Викривлення масштабів за рахунок різного нахилу променів по відношенню до горизонтальної земної поверхні виникають через те, що радар вимірює нахилену дальність до об'єкта, а не горизонтальну дальність уздовж земної поверхні. З рис. 21.7 видно, що хоча об'єкти A1 і B1 мають однакову протяжність уздовж земної поверхні, їх уявні розміри A2 і B2 в координатах нахиленої дальності, які і вимірює радіолокатор, різні.

Об'єкти біля ближнього краю смуги огляду стиснені порівняно з об'єктами біля дальнього краю. Ці викривлення враховуються за допомогою тригонометричних відношень.

Викривлення за рахунок рельєфу. Аналогічно викривленням, що виникають при зйомках за допомогою фотокамер і сканерів рельєфу, при радіолокації нерівної земної поверхні також виникають геометричні викривлення. Як і у сканерів, ці викривлення є одновимірні і проявляються в напрямках, перпендикулярних траєкторії польоту, причому вони більш проявляються при малих відстанях (дальностях).

Вкорочення (foreshortening) виникає через те, що передній схил гори чи пагорба складає певний кут з горизонтальною поверхнею (рис. 21.8).

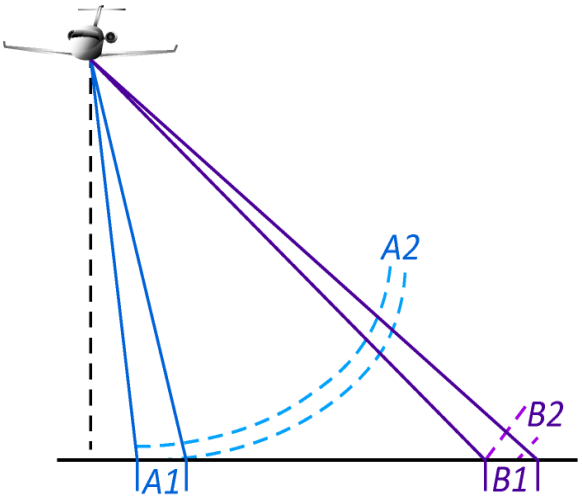


Рис. 21.7. *Викривлення масштабів за рахунок різного нахилу променів*

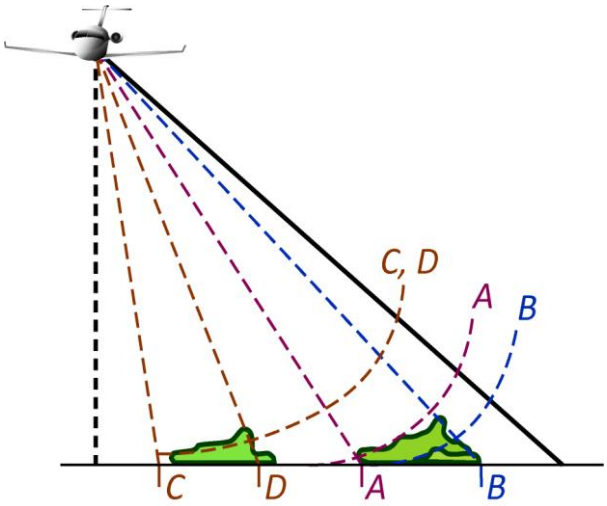


Рис. 21.8. *Виникнення вкорочення*

Оскільки радіолокатор вимірює нахилену дальність, схил AB буде здаватися більш коротким, ніж насправді, його довжина по координаті "нахилена дальність" дорівнює A`B`. Величина укорочення залежить від крутизни схилу і кута падіння радіолокаційного пучка. Максимальне скорочення спостерігається, коли пучок падає на схил перпендикулярно до його поверхні і, тим самим, промені досягають усіх його точок одночасно. Довжина схилу по координаті "нахилена дальність" при цьому дорівнює нулю.

Вкорочення переходить у від'ємне укорочення (layover), коли вершина гори чи пагорба B по координаті "нахилена дальність" виявляється ближчою до радіо-

локатора, ніж основа *A*. Відповідно, сигнал, відбитий від вершини, буде зафіксований раніше, ніж сигнал, відбитий від початку схилу. В результаті зображення вершини на радіолокаційному знімку виявиться ближче до радіолокатора. Іноді цей ефект називають перекиданням вершини. Ефекти вкорочення і від'ємне вкорочення на радіолокаційному зображенні дуже схожі. Від'ємне укорочення виникає при малих кутах падіння у ближнього краю смуги зображення і в гористих районах із крутими схилами.

Ефекти вкорочення за відсутності видимості заднього схилу супроводжуються радіолокаційним затіненням. Радіолокаційна тінь, як і оптична, спостерігається, коли пучок екранується якоюсь перепоною і не висвітлює затінену ділянку, яка на зображенні виділяється темним. Затінення сильніше проявляється біля далекого краю зображення.

21.4. Формування радіолокаційного зображення

Яскравість об'єктів на радіолокаційному зображенні визначається величиною відбитої енергії, що повернулась назад до радіолокатора. Ця величина залежить від багатьох параметрів. Ці параметри включають в себе характеристики радіолокаційних систем (частота, поляризація, геометрія огляду тощо) і характеристики поверхні (тип ґрунту, рельєф тощо). Більшість із цих характеристик взаємопов'язані, тому часто важко розділити вплив тієї або іншої характеристики на параметри зображення. Інакше кажучи, значення яскравості об'єктів на зображенні зазвичай є похідною від комбінації декількох характеристик. Ці характеристики можна розділити на три групи:

– шорсткість земної поверхні;

– геометрія радіолокаційного огляду і геометрія поверхні;

– вологість і електричні властивості поверхні.

Шорсткість земної поверхні визначає особливості розсіювання мікрохвиль поверхнею і є головним фактором, від якого залежить яскравість об'єктів. Під шорсткістю поверхні мають на увазі випадкові за своєю природою відхилення висоти поверхні від величини середнього значення. Характерні розміри шорсткості зазвичай не перевищують декількох сантиметрів-дециметрів. Важливо розуміти, що ступінь шорсткості для хвиль, що падають на поверхню, залежить також від довжини хвилі і кута падіння. Поверхня вважається "гладкою", якщо варіації її висот набагато менші від довжини випромінювання і, відповідно, вона буде шорсткою, коли ці варіації є порівнюваними з довжиною хвилі або більші від неї. Одна й та ж поверхня, отже, може бути шорсткою для більш коротких хвиль і "гладкою" для більш довгих хвиль. Гладка поверхня *A* (рис. 21.9) викликає дзеркальне відбиття, яке в основному відбивається в бік від носія відповідно до закону дзеркального відбиття.

Це проявляється на зображенні в тому, що гладка поверхня буде мати темні тони. Шорстка поверхня *B* розсіює падаюче випромінювання у всіх напрямках,

тобто дифузно, і певна частина енергії випромінювання буде розсіяна назад до радіолокатора. Це проявляється в тому, що на зображенні шорстка поверхня буде мати світлі тони. Роль кута падіння в прояві шорстких властивостей поверхні полягає в тому, що вплив шорсткості зменшується при збільшенні кута падіння.

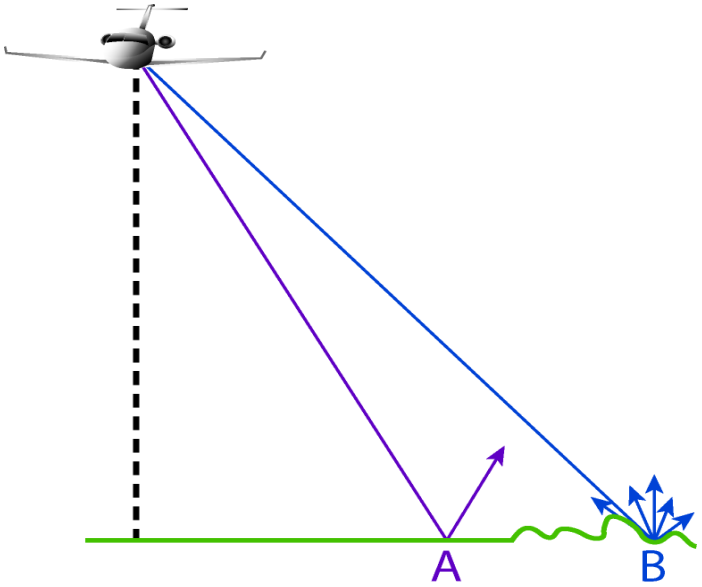


Рис. 21.9. *Відбиття від гладкої поверхні*

Простим прикладом цієї залежності є збільшення відбивних властивостей водної поверхні у міру заходу сонця за цю поверхню. Для радіолокаційного зображення дане явище буде проявлятись у тому, що при переміщенні від ближнього до дальнього краю смуги огляду загальний тон зображення буде темніти.

Істотний вплив на яскравість локальної ділянки поверхні здійснює локальний кут падіння A, який визначається як кут між напрямком падіння променя і перпендикуляром до площини, частиною якої є локальна ділянка поверхні. Для схилів, відображених до радіолокатора, локальний кут нахилу менший, ніж для плоскої горизонтальної поверхні, для якої кут падіння дорівнює куту огляду B. Ця обставина приводить до збільшення яскравості схилів на радіолокаційному зображенні.

Напрямок, під яким радіолокаційний пучок падає на поверхню, також впливає на характер зображення, особливо, коли поверхня має певну лінійну структуру, наприклад, сільськогосподарські поля або гірські ланцюги. Якщо цей напрямок падіння променя перпендикулярний до ліній, що утворюють структуру, відбиття буде достатньо значним, що проявиться в яскравості тону. При інших напрямках падіння променя ці тони будуть темнішими. Напрямок падіння і відбиття променя, який визначається напрямком польоту, має важливе значення для покращення контрасту між різними об’єктами на зображенні. Особливо важливий вибір напрямку руху платформи в гористих районах для мінімізації ефектів скорочення схилів і затінення.

Ідентифікацію зображення можна покращити, отримуючи зображення досліджуваної поверхні при різних напрямках польоту.

Об’єкти, що відбивають радіохвилі і мають дві чи більше поверхні, розташовані під прямим кутом одна до одної, можуть викликати "кутове відбиття" (рис. 21.10).

У куткових відбивачах хвиля послідовно відбивається від поверхонь, що утворюють ці відбивачі. Кутове відбиття зустрічається при зондуванні міських територій, де кутовими відбивачами є будівлі й інші штучні споруди. Природними кутовими відбивачами можуть бути прямовисні скелі, урвища, дерева. Механізм кутового відбиття приводить до підвищеної яскравості об’єктів у вигляді кутових відбивачів.

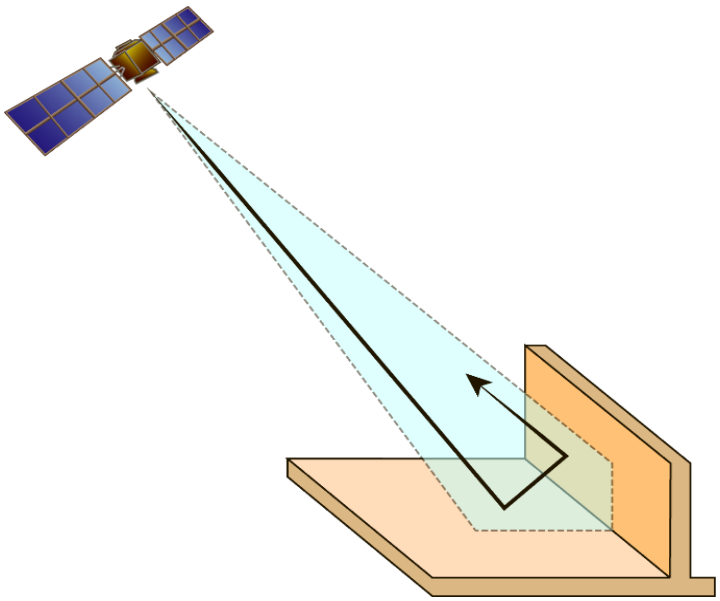


Рис. 21.10. *Механізм кутового відбиття*

Ступінь вологості об’єктів впливає на електричні властивості об’єктів або середовища. Електричними властивостями об’єктів, від яких залежать його відбивні і поглинальні властивості, є діелектрична проникність і провідність. Чим більші ці величини, тим сильніше відбиття і поглинання тієї частини випромінювання, яка пройшла під поверхнею. Збільшення вологості об’єктів збільшує їх діелектричну проникність і провідність і, отже, збільшує відбивну здатність. Наприклад, більш вологі ґрунти і рослинність будуть, відповідно, виділятись на зображенні більш яскравими тонами. Якщо вологість об’єкта достатньо мала, то частина випромінювання може проникнути під поверхню і розповсюдитись усередині об’єкта, причому, як уже зазначалось, глибина проникнення буде тим більшою, чим менша вологість. При проходженні хвиль крізь поверхню вони далі розповсюджуються або в дискретному (рослинність), або в безперервному (ґрунт) середовищах. При цьому виникає так зване об’ємне розсіювання, яке обумовлене неоднорідностями середовища. Наприклад, усередині лісу відбувається розсіювання на листі, гілках, стовбурах дерев, причому це розсіювання може бути багаторазовим. Об’ємне розсіювання може збільшувати або зменшувати яскравість залежно від того, яка частина випромінювання розсіюється назад (рис. 21.11).

21.5. Шуми радіолокаційного зображення

Усі радіолокаційні зображення мають той чи інший ступінь плямистості, яка викликається так званим *спекл-шумом* (англ. speckle – крапка, плямочка).

Спекл-шум (рис. 21.12) обумовлений тим, що яскравість кожного пікселя зображення формується в результаті інтерференції хвиль, розсіяних більш дрібними елементами пікселя. Ця інтерференція може призводити як до збільшення, так і до зменшення яскравості пікселя, порівняно з середнім значенням, отриманим при усередненні яскравостей сусідніх пікселів.

Рис. 21.11. *Механізм об'ємного розсіювання*

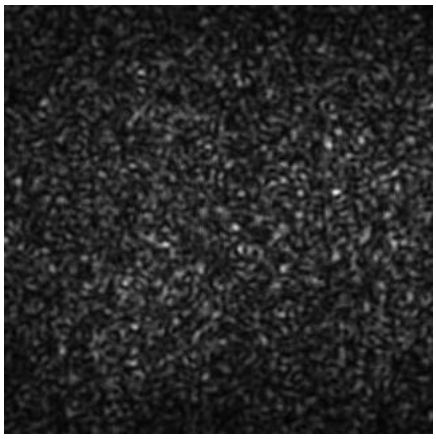


Рис. 21.12. *Приклад спекл-картини*

Спекл-шум, як і будь-який шум, погіршує якість зображення та ускладнює дешифрування радіолокаційного знімка. Зазначимо, що в оптичному діапазоні при пасивному зондуванні земної поверхні, освітленої сонцем, яскравість пікселя утворюється в результаті додавання інтенсивностей хвиль від елементарних розсіювачів усередині пікселя. Це так зване некогерентне додавання. Числове значення інтенсивності завжди позитивне, тому яскравість пікселя є просто арифметичною сумою яскравостей елементарних перевипромінювачів. При радіолокаційному зондуванні яскравість пікселя є результатом додавання так званих комплексних амплітуд хвиль від елементарних відбивачів усередині пікселя. Це когерентне додавання. Комплексні амплітуди можна подати у вигляді векторів, довжина яких дорівнює дійсній амплітуді хвилі, а фаза хвилі визначає напрямок вектора. Додавання векторів, як відомо, може приводити до різних результатів залежно від їх фаз, навіть якщо вектори мають незмінну амплітуду. Найпростіший і наочний приклад – додавання двох векторів з однаковими амплітудами. Якщо вектори синфазні, тобто їх напрямки збігаються, то результуюча амплітуда дорівнює подвоєній амплітуді кожного з векторів. При протифазності векторів, тобто коли кут між ними дорівнює 180^0, результуюча амплітуда дорівнює нулю. Фази елементарних розсіювачів у загальному випадку мають різні величини, отже, результуюча яскравість пікселя буде випадковою величиною.

Існує два способи зменшення впливу спеклів:

– багатопроменевий огляд поверхні;

– просторова фільтрація.

Багатопроменевий огляд (зйомка) поверхні полягає в розділенні радіолокаційного пучка на декілька більш вузьких пучків (променів). На рис. 21.13 показано поділ пучка А на п’ять променів. Кожний пучок-промінь дає незалежне зображення сцени, яке має свої спекли. Зменшення спекл-шуму досягається шляхом усереднення отриманих зображень.

Просторова фільтрація полягає в цифровій обробці одного зображення. Зменшення спекл-шуму здійснюється шляхом створення невеличкого вікна розміром 3×3 або 5×5 пікселів.

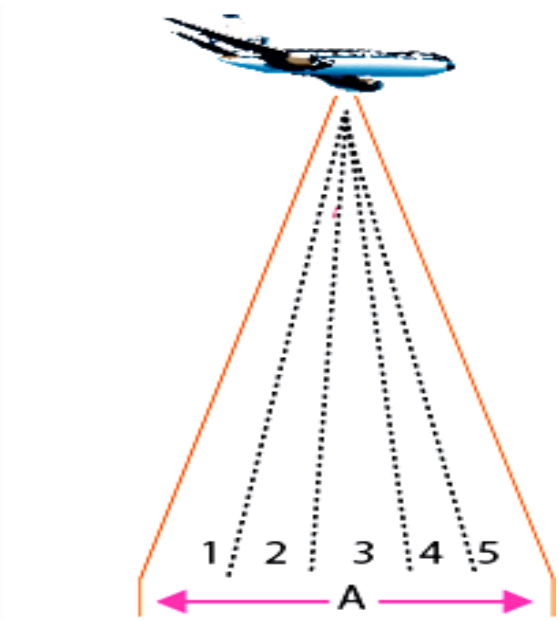


Рис. 21.13. *Багатопроменевий радіолокаційний огляд місцевості*

Яскравість центрального пікселя приймається рівною середній яскравості пікселів у вікні. Вікно пересувають по всьому зображенню, в результаті яскравість кожного пікселя корегується відповідно до розміру вікна (фільтрується у вікні) і зображення згладжується. Для зменшення спекл-шуму і мінімізації впливу згладжування можуть застосовуватись більш складні алгоритми обробки, ніж просте усереднення. Обидва способи зменшення спекл-шуму в результаті згладжування зображення приводять до зменшення просторового розрізнення. Тому необхідний баланс між зменшенням спекл-шуму і погіршенням просторового розрядження. Наприклад, якщо потрібне високе розрізнення, фільтрація повинна бути мінімальною або не застосовуватись взагалі. При дрібномасштабному картуванні допустиме істотне зменшення спеклів і згладжування зображення.

Для правильної побудови зображення радіолокатори періодично калібрують. Відносне калібрування необхідне для зіставлення яскравостей об’єктів на одному зображенні і порівняння зображень, отриманих у різний час.

Абсолютне калібрування необхідне для визначення значень напруженості сигналів, що приймаються. Це калібрування може слугувати для контролю і корегування енергетичного потенціалу радіолокатора.

21.6. Сучасні методи застосування радіолокаційного зондування

Характеристики космічних апаратів радіолокаційного ДЗЗ (станом на кінець 2015 р.) подано в табл. 21.1.

Крім стандартного використання даних радіолокаційного зондування, останніми роками розвиваються такі методи дослідження земної поверхні, як радарграмметрія, інтерферометрія, поляриметрія. Перший з цих методів використовує стереозйомку, принцип якої аналогічний традиційно використовуваним стереозйомкам, за допомогою фотокамер з борту літака. В процесі стереозйомки отримують стереопару зображень, що формується при кутах огляду, що відрізняються, або при зйомці з іншого боку досліджуваної смуги. Оцінка форми, розмірів об'єктів, висоти рельєфу для топографічного картування з аналізу даних стереопари називається радарграмметрією і за своєю суттю аналогічна фотограмметрії, що використовує аерофотозйомку для цих же цілей.

Таблиця 21.1

Характеристики космічних апаратів радіолокаційного ДЗЗ (станом на кінець 2015 р.)

Назва КА (системи)	Державна належність / рік запуску	Діапазон хвиль, см	Розмір сцени, км×км	Найкраще розрізнення, м	Об'єм інформації сцени / 1 км^2 поверхні, МБ×поляризація	Передача даних, Мбіт/с
SENTINEL-1A	ЄКА / 2014	6,0*	80×80	5×5	256,0 / 0,04 ×2п	520*
RISAT-1	Індія / 2012	5,6	10×10	2,0	25,0 / 0,25 ×1п	160×4
Cosmo-SkyMed -1, -2, -3, -4 (под. признач)	Італія / 2007, 2008, 2010	3,1	10×10	1,0	100,0 / 1,0 ×1п	310
HUAN JING-1C	КНР / 2012	9,4	40×40	5,0	64,0 / 0,04 ×1п	105×2*
Radarsat-2	Канада / 2007	5,6	20×20	3,0	89,2 / 0,22 ×4п	105×2
KOMPSAT-5	Пд. Кор. / 2013	3,2	5×5	1,0	25,0 / 1,0 ×4п	310
ALOS-2	Японія / 2014	23,6	25×25	1,0×3,0	208,3 / 0,33×1п	120/240
TerraSAR-X	ФРН / 2007	3,1	5×10	1,0	50,0 / 1,0×1п	300
TANDEM-X	ФРН / 2010	3,1	5×10	1,0	50,0 / 1,0×1п	300*

Примітка: (*) – експертні (приблизні) оцінки значення характеристики.

Для визначення висоти рельєфу також використовується інший, більш сучасний метод, який заснований на принципах інтерферометрії. В інтерферометрії основним вимірюваним параметром є фаза хвилі. Нехай дві хвилі з однією і тією ж довжиною і частотою розповсюджуються в просторі, але початкова точка однієї хвилі зміщена відносно початкової точки іншої хвилі. Різниця між відповідними точками обох хвиль визначає різницю фаз цих хвиль. Інтерферометричні

системи використовують дві антени, що рознесені за дальністю на незначну величину і реєструють розсіяні хвилі від кожного елемента поверхні. Обидві антени інтерферометра можуть знаходитись на одній і тій же платформі або ж їх дані можуть бути отримані з двох різних проходів з однією й тією ж антеною. Шляхом виміру дальності фаз двох хвиль різниця нахилених дальностей може бути обчислена з точністю, яка приблизно дорівнює аналогічній довжині хвилі (тобто сантиметри). При відомому положенні антен відносно Землі можна визначити координати і висоту елемента поверхні.

Зображення, де значення всіх елементів поверхні подані у вигляді відповідних яскравостей їх кольорів, має назву інтерферограми. За допомогою інтерферограми можна отримати тривимірне зображення земної поверхні на основі одержаної цифрової моделі рельєфу (ЦМР). Всі радіолокатори, що використовують інтерферометрію, є радіолокаторами з інтегрованою апертурою і відповідно називаються інтерферометричними РСА. В закордонній літературі їх називають interferometric synthetic aperture radar (InSAR).

Нарешті, радіолокаційна поляриметрія, яка згадувалась попередньо, ґрунтується на залежності відбивних властивостей об’єктів від виду поляризації. Більшість радіолокаторів випромінюють мікрохвилі або на горизонтальній (H), або на вертикальній (V) поляризаціях і, відповідно, приймають відбитий сигнал на одній відповідній поляризації.

Поляриметричні радіолокатори передають і приймають хвилі на обох поляризаціях. Таким чином, вони можуть прийняти та обробити сигнали у комбінаціях (HH, HV, VH та VV).

Сигнал кожного з цих "поляризаційних каналів" при зондуванні одного й того ж елемента поверхні має різні характеристики, що дозволяє покращити процес дешифрування об’єктів.

Питання для самоконтролю

1. *Назвіть принципи радіолокації.*
2. *В чому полягають особливості радіолокаційної зйомки?*
3. *Охарактеризуйте причину викривлень радіолокаційних зображень.*
4. *Як формується радіолокаційне зображення?*
5. *Чому виникають шуми радіолокаційного зображення?*
6. *Перерахуйте сучасні методи застосування радіолокаційного зондування.*

XXII. ТЕХНОЛОГІЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ЗЙОМКИ

Радіолокаційна зйомка – це вид аеро- та супутникової зйомки, що здійснюється радіолокатором – активним мікрохвильовим сенсором, здатним випромінювати і приймати відбиті від земної поверхні поляризовані радіохвилі в певному діапазоні довжин хвиль (частот).

На радіолокаційних знімках яскравістю закодована кількість відбитого випромінювання, але не сонячного, як на звичних для нас знімках у видимому діапазоні, а випромінювання, що створено радіолокатором.

22.1. Довжина і частота радіохвиль при радіолокаційній зйомці земної поверхні

Авіаційна і космічна радіолокаційна зйомки здійснюються в міліметровому, сантиметровому і дециметровому діапазонах довжин хвиль (λ). Поряд з довжиною хвилі часто використовують іншу характеристику – частоту (ν). Ці обидві величини пропорційні швидкості світла у вакуумі:

$$c=\lambda\nu.$$

Для позначення діапазонів радіолокаційної зйомки використовують спеціальні латинські буквосполучення (табл. 22.1).

Таблиця 22.1

Діапазони радіолокаційної зйомки

Позначення діапазону	Довжина хвилі (см)	Частота (ГГц)
Ka	0,75 – 1,18	40,0 – 26,5
K	1,19 – 1,67	26,5 – 18,0
Ku	1,67 – 2,4	18,0 – 12,5
X	2,4 – 3,8	12,5 – 8,0
C	3,9 – 7,5	8,0 – 4,0
S	7,5 – 15,0	4,0 – 2,0
L	15,0 – 30,0	2,0 – 1,0
P	30,0 – 100,0	1,0 – 0,3

Радіохвилі здатні проникати крізь хмари, що дозволяє отримувати радіолокаційні зображення незалежно від погодних умов. В деяких випадках можливе одержання відбитого сигналу від об’єктів, розташованих нижче рівня поверхні, при цьому проникаюча спроможність радіосигналу зростає при збільшенні

довжини хвилі. Так, на радіолокаційних знімках під товщею пухких ґрунтів, наприклад піску, можуть бути виявлені ґрунтові води або деякі геологічні структури. При зондуванні деревної рослинності в X-діапазоні відбиття відбувається від крон дерев, а при збільшенні довжини хвилі – від гілок і стволів, від ґрунтового покриву тощо (рис. 22.1).

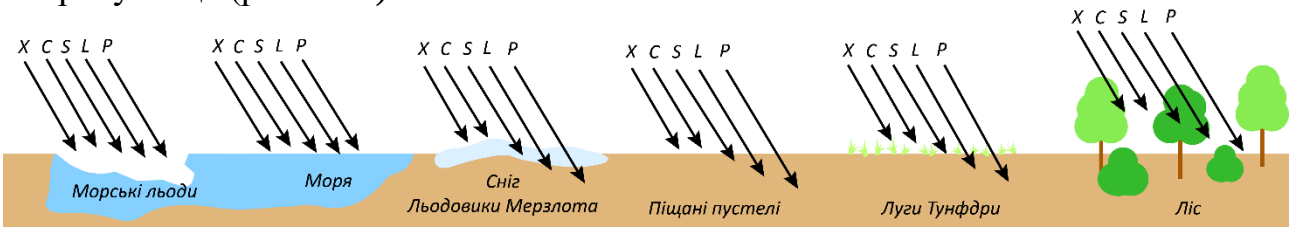


Рис. 22.1. *Проникна здатність радіохвиль*

22.2. Поляризація сигналу

Поляризація електромагнітної хвилі визначається орієнтацією вектора напруженості електричного поля в площині, перпендикулярній напрямку розповсюдження хвилі.

Сигнал, що посилається і приймається антенною радіолокатора, поляризований: електричний вектор коливається, як правило, в одному з двох напрямків: горизонтальному H або вертикальному V (іноді при випромінюванні використовують кругову поляризацію). Розрізняють поляризацію узгоджену, при якій сигнали, що посилається і приймається поляризовані однаково (HH, VV), і перехресну (або крос-поляризацію), при якій напрямки поляризації в сигналах, що посилається і приймається взаємно перпендикулярні (HV, VH) (рис. 22.2).

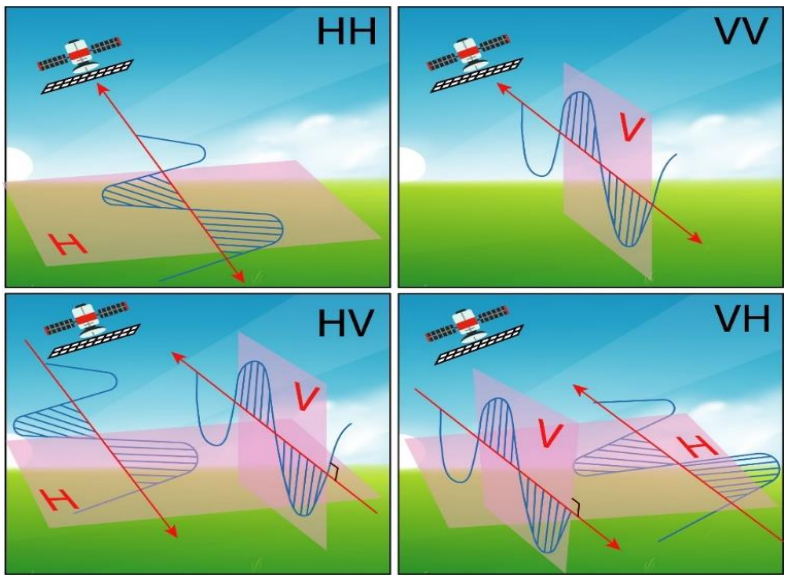


Рис. 22.2. *Поляризація радіохвиль*

Поляризація хвилі може змінюватись різним чином в результаті взаємодії з різними об’єктами місцевості, що дозволяє виявляти їх нові властивості.

22.3. Геометрія радіолокаційної зйомки

Особливості геометричних властивостей радіолокаційних зображень обумовлені нахилом зондуючого променя до поверхні. В процесі польоту супутника по орбіті (напрямок руху носія радіолокаційної системи називають *азимутом зйомки*) антена на його борту випромінює радіохвилі в напрямку земної поверхні під кутом до неї (напрямок випромінювання називають *дальністю*).

Радіолокаційне зображення формується шляхом реєстрації відбитого поверхнею (зворотного) сигналу по *нахиленій дальності* (цим терміном прийнято називати відстань від антени до поверхні). Зйомку безпосередньо під носієм (в надир) не виконують, оскільки в цьому разі дальності несуттєво відрізняються, зворотні сигнали від об'єктів місцевості, що знаходяться поруч, повертаються до радіолокатора майже одночасно і на знімку ці об'єкти дуже важко розрізнити.

Кутом зйомки зазвичай називають *кут падіння* θ (в англомовній літературі використовують термін *incidence angle*) – це кут між напрямком радіосигналу, що посилається і відвісною лінією, проведену через точку, в яку направлений сигнал. Ділянки місцевості, що знімаються, найменш віддалені від надиру, називають ближньою зоною, а найбільш віддалені – дальньою зоною. Відповідні їм кути падіння позначаються $\theta_б$ та $\theta_д$ (рис. 22.3).

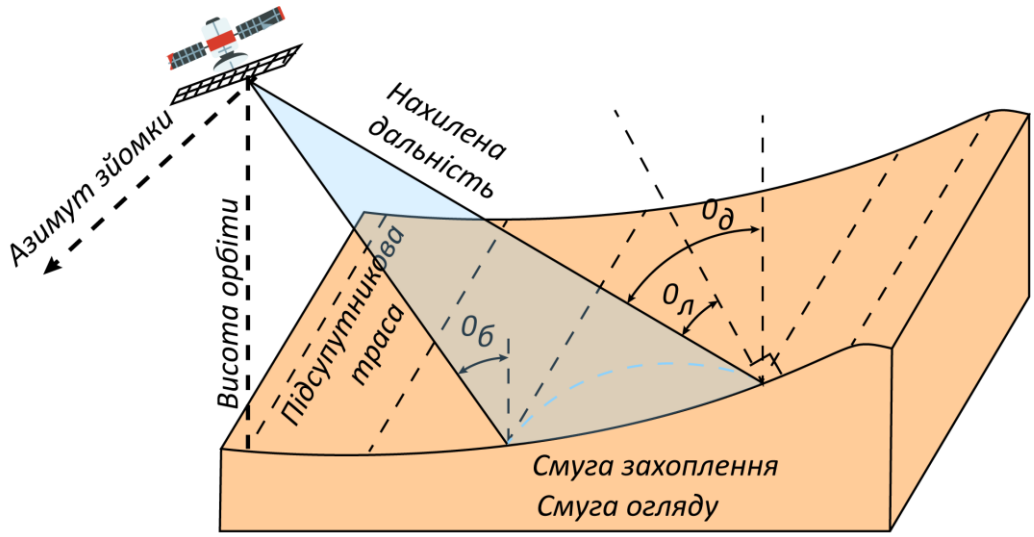


Рис. 22.3. *Геометрія радіолокаційної зйомки*

У випадку нахилу поверхні зондування виділяють локальний кут падіння $\theta_л$ – кут між напрямком радіохвилі і нормаллю до схилу. Кут падіння хвилі для сучасних космічних радіолокаційних систем може варіюватись у широкому інтервалі: наприклад, для Radarsat-2 – від 10° до 60°, для ALOS-2/PALSAR-2 – від 8° до 70°.

Весь діапазон кутів падіння визначає ширину смуги огляду – смугу на земній поверхні, в межах якої може здійснюватися зйомка. Більш вузька смуга на поверхні Землі, зйомка якої здійснюється при поточному положенні променю, називається смугою захоплення.

Якщо вихідні радіолокаційні зображення представлені в *проєкції нахиленої дальності*, то об'єкти, розташовані ближче до радіолокатора, будуть виглядати більш стиснутими порівняно з об'єктами, розташованими далі від нього (рис. 22.4).

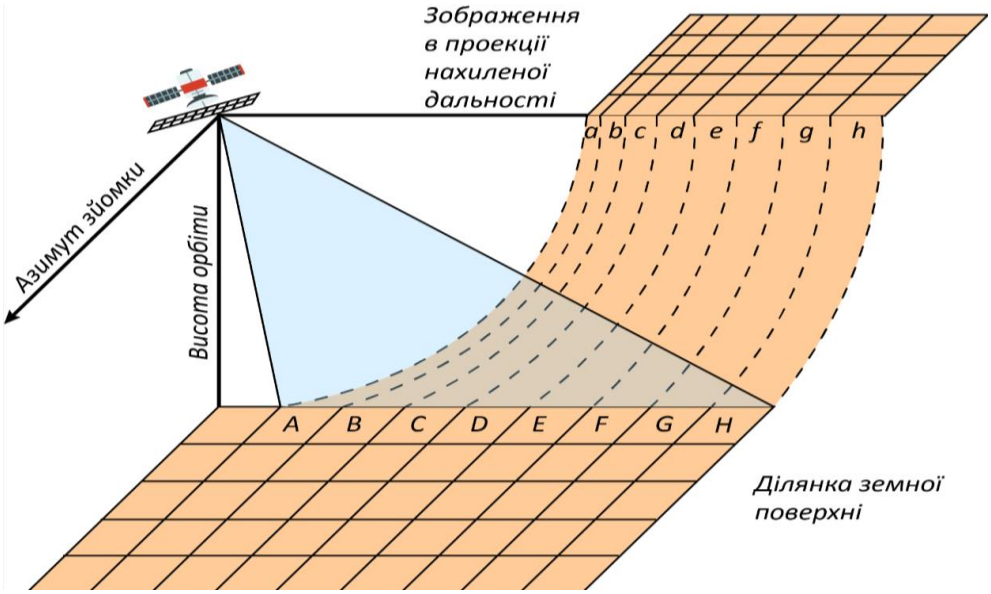


Рис. 22.4. *Нахилена і наземна дальності*

Для правильного відображення місцевості зображення з проєкції нахиленої дальності перераховують у *проєкцію наземної дальності.*

22.4. Просторове розрізнення радіолокаційних зображень

Просторове розрізнення радіолокаційних зображень визначається властивостями антени і розрізняється в напрямку дії антени (дальності) і в напрямку руху супутника (азимута).

Розрізнення по нахиленій дальності ρ_{sr} (у напрямку перпендикулярному, напрямку польоту) пропорційна тривалості імпульсу: чим коротший імпульс, тим вище розрізнення (рис. 22.5). Воно розраховується за формулою:

$$\rho_{sr}=\tau c/2,$$

де τ – тривалість імпульсу;
c – швидкість світла в вакуумі.

При роботі зі знімками має значення просторове розрізнення (або розмір елемента розрізнення) на земній поверхні ρ_{gr}, яке визначається через розрізнення по нахиленій дальності за формулою:

$$\rho_{gr}=\rho_{sr}/\cos(90-\theta)=\rho_{sr}/\sin\theta,$$

де θ – кут падіння хвилі.

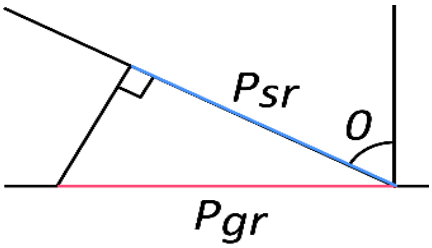


Рис. 22.5. *Просторове розрізнення по нахиленій і наземній дальності*

Просторове розрізнення радіолокаційних зображень по азимуту ρ_a легко визначається для радіолокаторів бокового огляду (РБО) за формулою:

$$\rho_a = S_{rd}\lambda / L,$$

де S_{rd} – нахилена дальність до поверхні,
λ – довжина хвилі;
L – горизонтальний розмір реальної антени. Для таких систем можливості підвищення просторового розрізнення обмежуються розмірами антени. Так, для космічних РБО, що здійснюють зондування в Х-діапазоні ($\lambda \approx 3$ см), при розмірі реальної антени 10 м і нахиленій дальності в кілька сотень кілометрів розрізнення по азимуту буде складати близько 2 км.

Найбільш високе просторове розрізнення забезпечують радіолокатори з синтезованою апертурою (РСА). Принцип їх роботи заснований на реєстрації і наступної когерентної обробки сигналів, прийнятих від об'єкта місцевості А (рис. 22.6) в процесі руху носія на ділянці орбіти, яка називається інтервалом синтезування (L_{synt}).

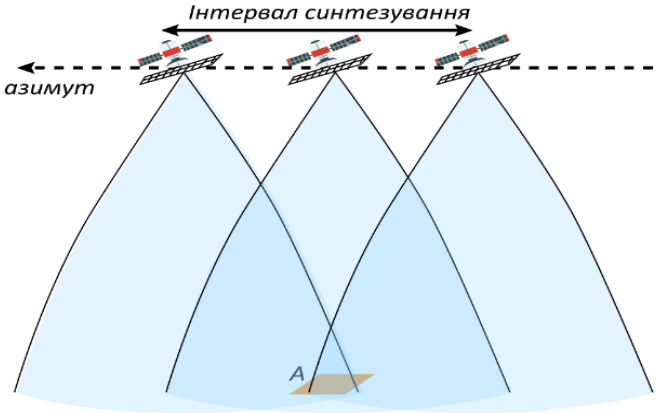


Рис. 22.6. *Радіолокатор із синтезованою апертурою*

В загальному випадку розрізнення РСА по азимуту обчислюється за наступною формулою:

$$\rho_a = S_{rd}\lambda / 2L_{synt}.$$

Сьогодні вся радіолокаційна зйомка Землі з космосу здійснюється радіолокаторами із синтезованою апертурою.

22.5. Режими огляду космічних РСА

Радіолокаційна зйомка Землі ведеться при різних режимах огляду місцевості: широкозахватному (ScanSAR), маршрутному (StripMap) і прожекторному (SpotLight). Ці режими відрізняються технологією одержання зображень, їх просторовим охопленням і розрізненням.

При широкозахватному режимі (рис. 22.7) широку смугу захоплення отримують шляхом послідовного переключення імпульсу в напрямку зйомки. В цьому режимі смуга захоплення може досягати сотень кілометрів, однак просторове розрізнення низьке – десятки і сотні метрів.

При маршрутному режимі (рис. 22.7) зйомка здійснюється в межах однієї смуги, ширина якої досягає десятків кілометрів. Просторове розрізнення в цьому випадку досягає кількох метрів.

При прожекторному режимі огляду (рис. 22.7) в процесі руху супутника промінь антени багатократно спрямовують у центр ділянки зйомки. В цьому режимі отримують мінімальне просторове охоплення, але й найвище просторове розрізнення – до часток метра.

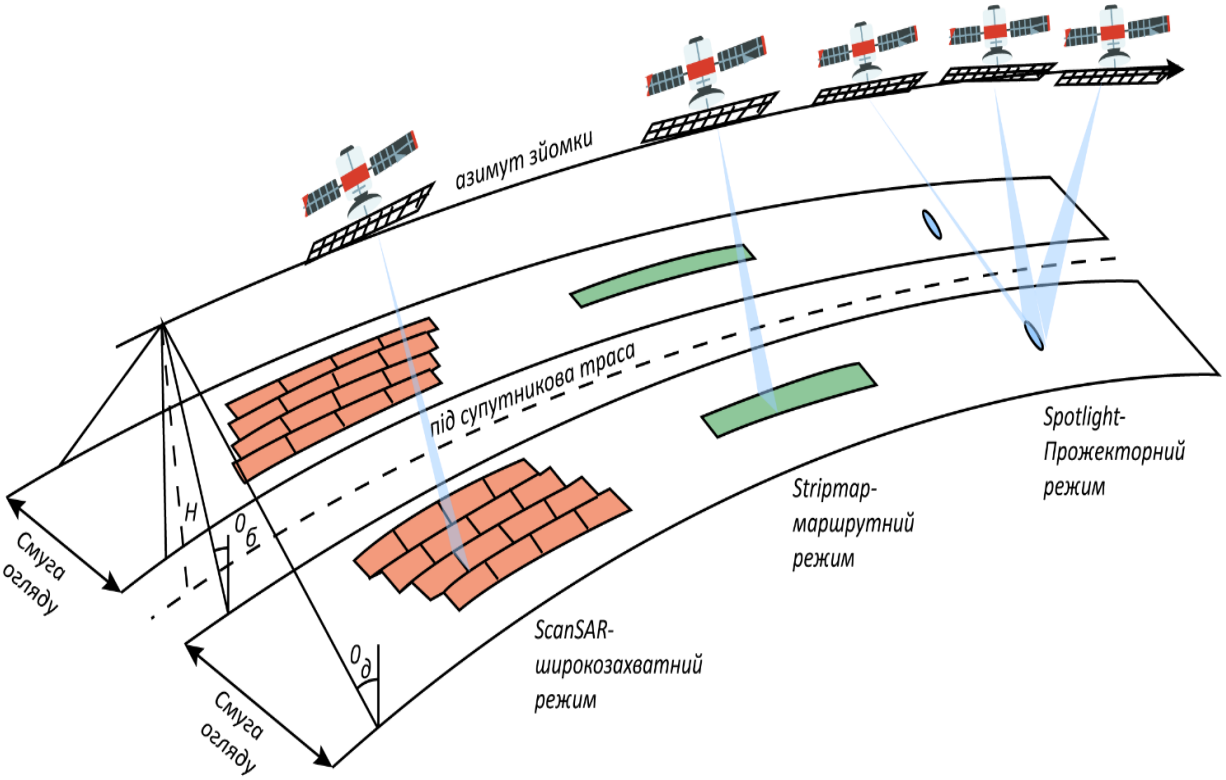


Рис. 22.7. *Режими огляду космічних радіолокаторів із синтезованою апертурою*

На рис. 22.8 зображено приклад зйомки TerraSAR-X Панамського каналу. Режим зйомки Wide ScanSAR: просторове розрізнення 40 м, ширина смуги зйомки 270 км.

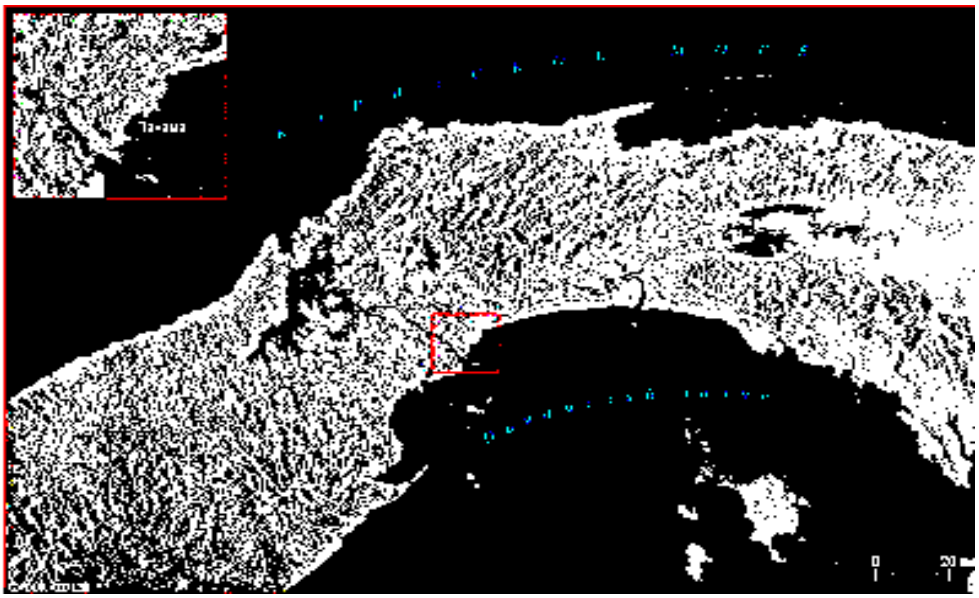


Рис. 22.8. *TerraSAR-X, Панамський канал. Режим зйомки Wide ScanSAR: просторове розрізнення 40 м, ширина смуги знімання 270 км*

На рис. 22.9 подано приклад зйомки TerraSAR-X, м. Сендай, Японія. Режим зйомки StripMap: просторове розрізнення 3 м, ширина смуги зйомки 30 км

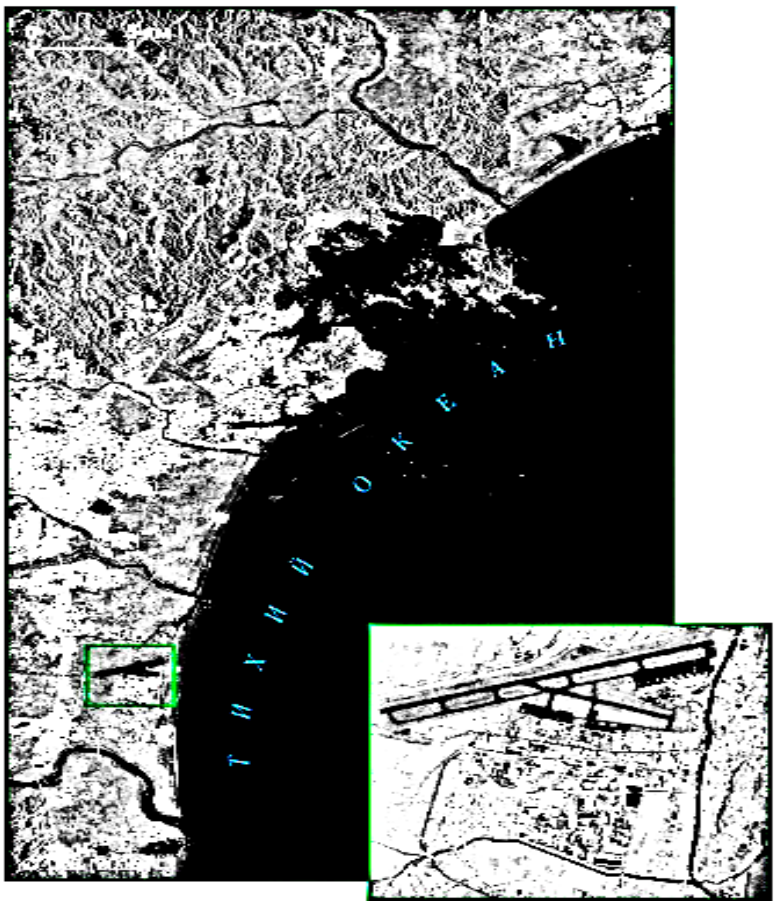


Рис. 22.9. *TerraSAR-X, м. Сендай, Японія. Режим зйомки StripMap: просторове розрізнення 3 м, ширина смуги зйомки 30 км*

На рис. 22.10 зображено відкриту стоянку Центрального музею Військово-повітряних Сил РФ в Моніно (Московська область). Режим зйомки Staring SpotLight: просторове розрізнення < 1 м, розмір ділянки знімання 4 км.

Рис. 22.10. *TerraSAR-X, відкрита стоянка Центрального музею Військово-повітряних Сил РФ в Моніно (Московська область). Режим зйомки Staring SpotLight: просторове розрізнення <1 м, розмір ділянки знімання 4 км*

22.6. Режими роботи космічних РСА

Поляриметричний режим: одночасного одержання радіолокаційних зображень при різній поляризації радіохвиль. Така зйомка здійснюється не всіма системами і залежить від технічних особливостей конкретної знімальної апаратури. Можлива зйомка у скороченому (комбінації HH і HV, VV і VH або HH і VV) або повному поляриметричному режимі (одночасно HH, HV, VH і VV). В останні роки з'явились знімальні системи (наприклад, Risat-1), що здійснюють зйомку в режимі так званої компактної поляриметрії, коли сигнал, що посилається в напрямку земної поверхні, має кругову поляризацію.

Багаточастотний режим: одержання радіолокаційних знімків одночасно при різних довжинах хвиль. Історично унікальною була система SIR-C/X-SAR, що працювала одночасно в діапазонах X, C і L.

У 2019 р. планувалося створення кількох багаточастотних систем: канадська OptiSAR (X і L) та індійсько-американська NISAR (S і L). OptiSAR реалізована не була, натомість у 2025 р. успішно запущено NISAR, яка стала першою орбітальною багаточастотною місією (S+L).

Інтерферометричний режим: повторні радіолокаційні зйомки однієї і тієї ж ділянки місцевості при дотриманні таких умов:

1) зондування ідентичною апаратурою при однакових параметрах;

2) зондування з близько розташованих точок орбіти, відстань між якими називається інтерферометричною базою.

Виділяють повздовжню, поперечну і часову інтерферометричні бази, які характеризують взаємне положення радіолокаторів у часі і в просторі. Різні види інтерферометричної бази використовуються для розв'язку різних задач: поздовжня – для виявлення рухомих об'єктів, поперечна – для побудови цифрових моделей рельєфу, часова – для виявлення змін об'єктів, зміщень земної поверхні.

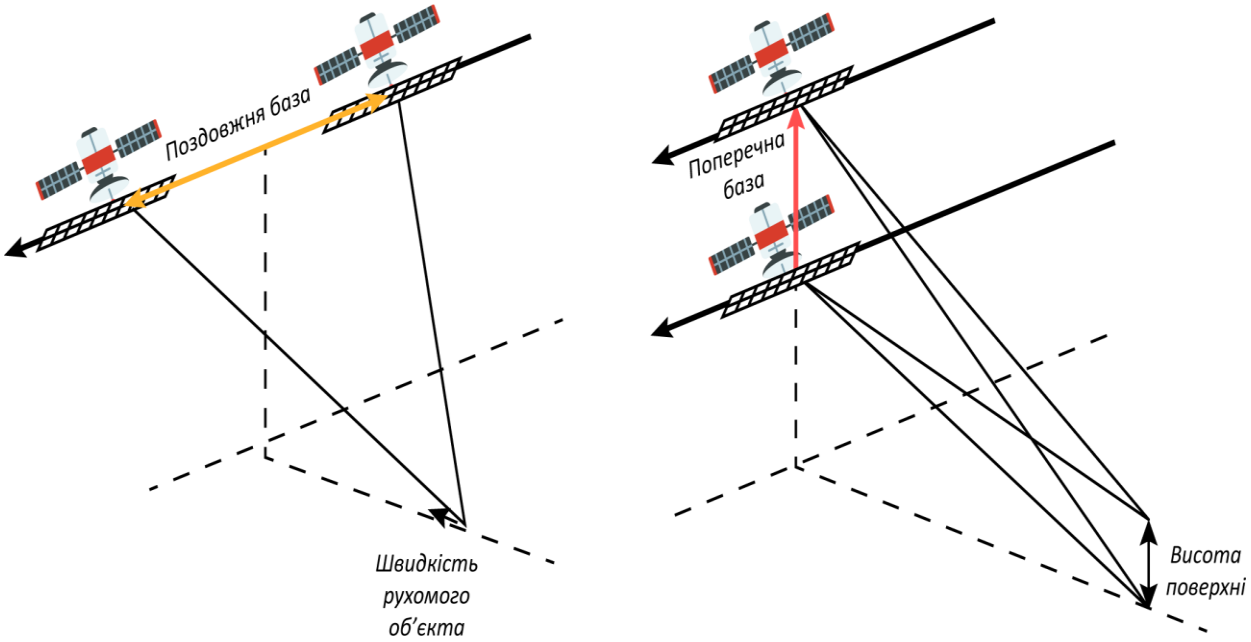


Рис. 22.11. *Види інтерферометричної бази*

Повторність зйомки однієї і тієї ж території при інтерферометричному режимі реалізується різними шляхами (рис. 22.12):

1) синхронно, коли на літальному апараті встановлені два радіолокатори, рознесених на певну відстань, один з яких працює як на випромінювання, так і на прийом сигналу, а другий – тільки на прийом (інтерферометрія з "жорсткою" базою) (наприклад Shuttle Radar Topography Mission);

2) в режимі "тандем" – двома ідентичними радіолокаторами при русі космічних апаратів-носіїв по близько розташованих паралельних орбітах (одна з різновидів інтерферометрії з "м'якою" базою, наприклад, TerraSAR-X/TanDEM-X);

3) послідовно – перша зйомка виконується в момент часу t, наступні зйомки – з цього ж супутника (або аналогічного) на повторному витку орбіти через інтервал часу Δt, кратний періоду повтору траси польоту (іноді такий варіант зйомки також називають інтерферометрією з "м'якою" базою, наприклад, повторна зйомка із супутника Radarsat-2 можлива з інтервалом у 24 дні, із супутника ALOS-2 – 14 днів).

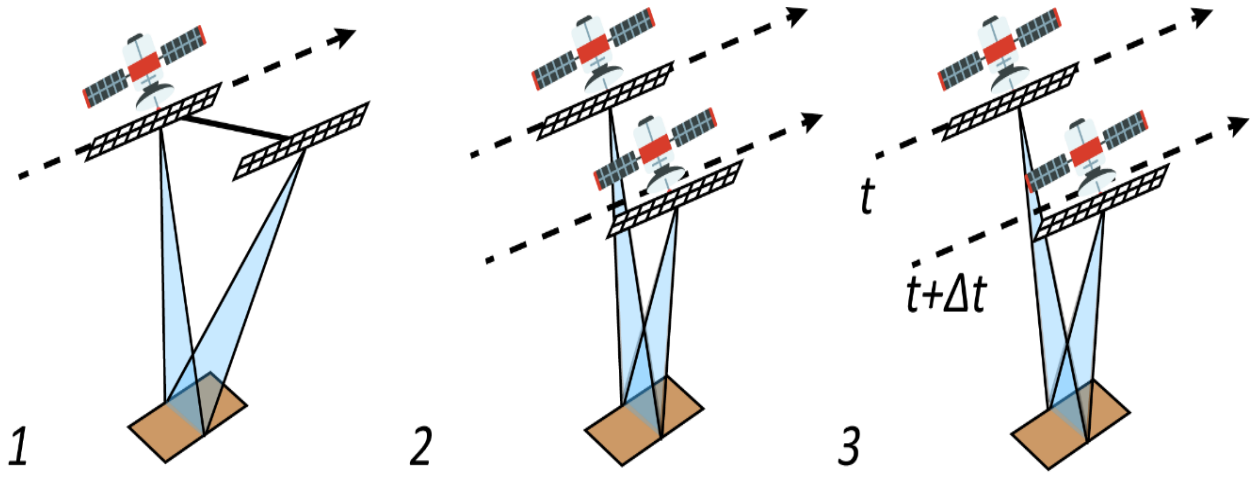


Рис. 22.12. *Варіанти проведення інтерферометричних зйомок*

Останнім часом загалом спостерігається тенденція до збільшення кількості знімальних режимів, у яких ведеться робота космічних радіолокаторів. Так, системою Radarsat-1 здійснювалась зйомка в 7, а Radarsat-2 – уже в 17 режимах, що характеризуються комбінацією таких параметрів: просторове розрізнення, ширина смуги захоплення, діапазон кутів зйомки і набір поляризаційних каналів.

22.7. Властивості об’єктів, що впливають на характер радіолокаційного зображення

На характер радіолокаційного зображення впливають шорсткість, діелектричні властивості поверхні та механізми розсіювання радіохвиль.

Шорсткість поверхні. Інтенсивність відбитого сигналу і, відповідно, яскравість ділянки радіолокаційного знімку залежить від шорсткості поверхні (розмірів нерівностей відносно довжини радіохвилі) – h: чим вона вище, тим більша потужність зворотного сигналу (рис. 22.13).

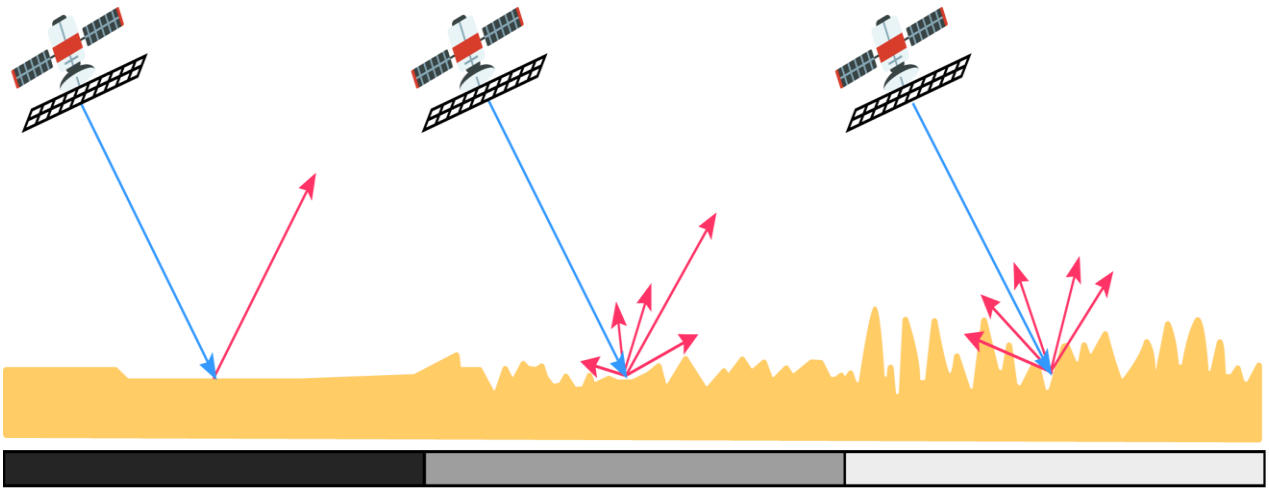


Рис. 22.13. *Схематичне подання впливу шорсткості поверхні на інтенсивність зворотного сигналу*

У відповідно до критерію Релея, поверхня вважається гладкою при розмірах шорсткостей:

$$h<\lambda/8\cos\theta,$$

де λ – використовувана при зйомці довжина хвилі;
θ – кут падіння хвилі.

На рис. 22.14 подано знімки однієї і тієї ж земельної ділянки у випадку нерозораного і розораного ґрунту.

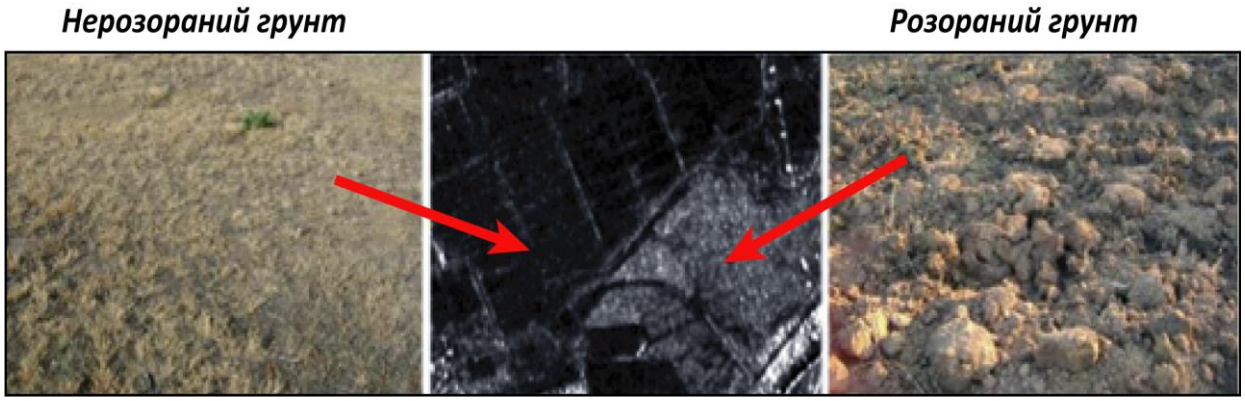


Рис. 22.14. *Ділянки розораного і нерозораного ґрунту на радіолокаційному знімку на Radarsat-2*

Діелектричні властивості поверхні. Значний вплив на відбивну здатність об'єктів у радіохвильовому діапазоне здійснюють їх діелектричні властивості, тобто здатність змінювати електромагнітне випромінювання, що надходить. Діелектричні властивості прийнято характеризувати кількісно коефіцієнтом відносної діелектричної проникності ε. Відомо, що сухі ґрунти мають значення ε від 3 до 8, а вода – 80. Чим менше ε, тим на більшу глибину проникають радіохвилі і менша відбивна здатність поверхні. Саме з більшою глибиною проникнення пов'язане те, що сухі ґрунти дають менший зворотний сигнал (більш темні на радіолокаційному зображенні), ніж зволожені ґрунти. Аналогічна ситуація спостерігається і для рослинності: чим вищий рівень вмісту вологи в частинах рослин, тим вища інтенсивність зворотного розсіювання сигналу.

Механізми розсіювання радіохвиль. Радіохвилі, що надійшли до земної поверхні від радіолокатора, різним чином взаємодіють розташованими на ній об'єктами.

Виділяють 3 основні види такої взаємодії, що називаються механізмами розсіювання: 1 – однократне, 2 – двократне, 3 – об'ємне (рис. 22.15).

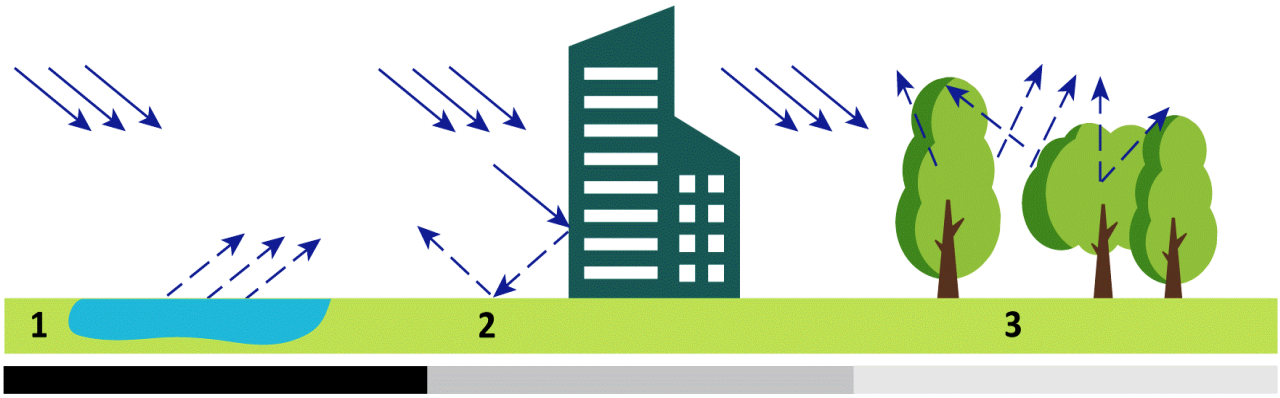


Рис. 22.15. *Схематичне подання механізмів розсіювання радіохвиль*

При однократному розсіювання хвилі дзеркально відбиваються в бік, протилежний радіолокатору. Об'єкти, які характеризуються однократним розсіюванням, мають рівну поверхню (наприклад, водна гладь, відкритий ґрунт тощо) і на радіолокаційному зображенні відображуються найбільш темними. Двократне розсіювання властиве вертикально орієнтованим об'єктам, наприклад, будівлям. Вони мають найбільшу яскравість на знімках. При об'ємному розсіюванні відбувається багаторазове перевідбиття радіохвиль від частин об'єктів (наприклад, від листя, гілок та стовбурів дерев). Об'єкти, що характеризуються об'ємним розсіюванням, мають проміжні значення яскравості (рис. 22.16).

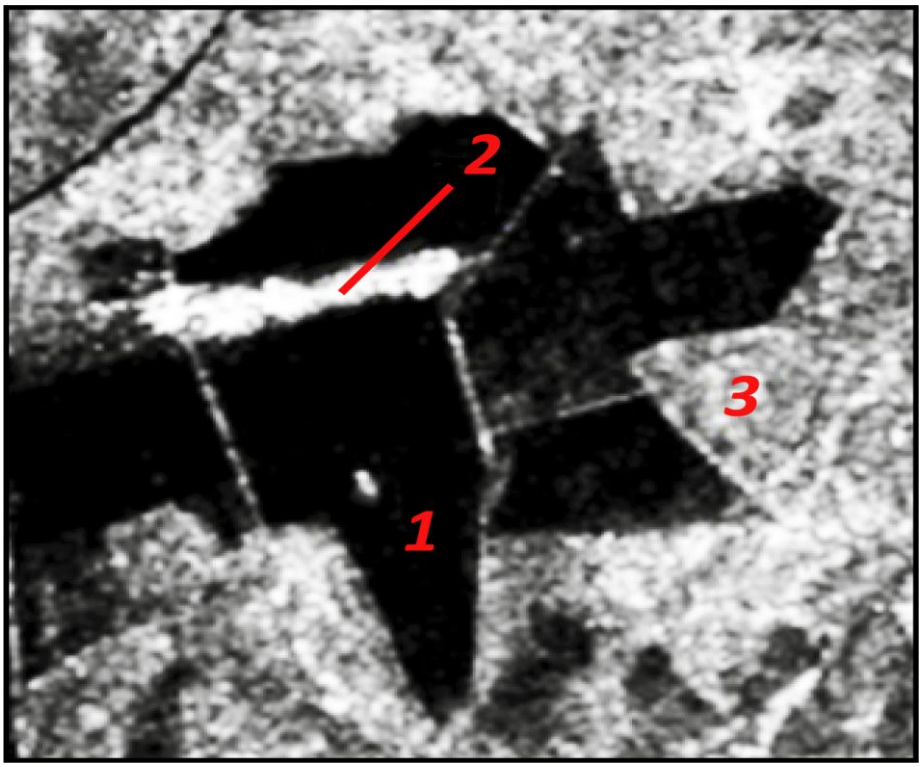


Рис. 22.16. *Радіолокаційний знімок ALOS/PALSAR. Об'єкти, що характеризуються різними видами розсіювання: 1 – безліса ділянка (однократне), 2 – населений пункт (двократне), 3 – ліс (об'ємне)*

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення поняття "радіолокаційна зйомка" та поясніть її відмінності від зйомки в оптичному діапазоні електромагнітного спектра.

2. Поясніть вплив довжини хвилі та частоти випромінювання на проникну здатність радіохвиль та відбивні властивості об'єктів земної поверхні.

3. Розкрийте сутність поляризації електромагнітної хвилі та охарактеризуйте види поляризаційних комбінацій (узгоджена та перехресна поляризація).

4. Що таке кут падіння радіохвилі? Охарактеризуйте ближню та дальню зони радіолокаційної зйомки.

5. Визначте чинники, що впливають на просторове розрізнення радіолокаційних зображень у напрямках дальності та азимуту, та наведіть відповідні формули його обчислення.

6. Назвіть та охарактеризуйте основні режими зйомки космічних радіолокаторів із синтезованою апертурою (ScanSAR, StripMap, SpotLight).

7. Поясніть, як шорсткість, діелектричні властивості поверхні та механізми розсіювання радіохвиль впливають на яскравість і тональні характеристики об'єктів на радіолокаційних зображеннях.

Список використаних джерел

1. Байрак, Г. Р. (2007). *Аналіз рельєфу і природокористування рівнин заходу України за аерокосмічними даними*. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.
2. Байрак, Г. Р., & Муха, Б. П. (2010). *Дистанційні дослідження Землі: навч. посіб.* Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.
3. Білоус, В. В., & Боднар, С. П. (2021). *Фотограмметрія: навч. посіб.* Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка.
4. Білоус, В. В., Боднар, С. П., Курач, Т. М., Молочко, А. М., Патиченко, Г. О., & Підлесецька, І. О. (2011). *Дистанційне зондування з основами фотограмметрії: навч. посіб*. Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".
5. Болсуновський, М. А. (2006). *Дистанційне зондування землі: навч. посіб*. Львів: Вид-во Львівської політехніки.
6. Бурштинська, Х. В., & Станкевич, С. А. (2013). *Аерокосмічні знімальні системи*. Львів: Вид-во Львівської політехніки.
7. Васильєва, І. К. (2008). *Дистанційне зондування землі: метод. вказівки до самост. роботи*. Харків: ХНУРГ.
8. Готинян, В. С., & Красовський, Г. Я. (2007). Дистанційне зондування Землі / *Регіональна нарада "Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ-технологій у сприянні вирішення проблем Луганщини"* с. 89–109.
9. Довгий, С. О., Лялько, В. І., Бабійчук, С. М., Кучма, Т. Л., Томченко, О. В., & Юрків, Л. Я. (2019). Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування. Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України.
10. Дорожинський, О. Л. (2003). *Дистанційне зондування Землі: метод. посіб*. Львів: Вид-во Львівської політехніки.
11. ДСТУ 3513:2021. *Метеорологія. Терміни та визначення основних понять*. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021.
12. ДСТУ 3518-97. *Термометрія. Терміни та визначення*. Київ: Держстандарт України, 1997.
13. ДСТУ 4220–2003. *Дистанційне зондування Землі: Терміни та визначення понять*. Київ: Держспоживстандарт України, 2003.
14. ДСТУ 4758:2007. *Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять*. Київ: Держспоживстандарт України, 2007.
15. Зацерковний, В. І. (2018). *Геоінформаційні системи та технології: підручник*. Київ: КНУБА.
16. Іванов, В. К., Пащенко, Р. Е., Стадник, А. М., & Яцевич, С. Е. (2006). *Авіаційна та космічна техніка: навч. посіб*. Київ: НАУ.
17. Іванов, О. Ю., Бабкіна, А. С., Романовський, А. А., & Романовський, Є. А. (2009). *Дистанційне зондування Землі та фотограмметрія: навч. посіб*. Київ: НАУ.

18. Ільченко, М. Ю., Наритник, Т. М., Присяжний, В. І., Капштик, С. В., & Матвієнко, С. А. (2020). *Низькоорбітальна супутникова система інтернету речей на основі розподіленої супутникової архітектури. Космічна наука і технологія,* 26(4), 59–68. URL: https://doi.org/10.15407/knit2020.04.059

19. Кветний, Р. Н. (2012). *Основи дистанційного зондування Землі: навч. посіб*. Львів: Вид-во Львівської політехніки.

20. Кирлик Д. В., Калинич І. В., & Пічкар Л. І. (2024). *Основи картографування. Курс лекцій для студентів природничо-гуманітарного фахового коледжу спеціальності 193 Геодезія та землеустрій*. Ужгород: Вид-во УжНУ "Говерла".

21. Коберниченко, В. Г. (2013). *Основи дистанційного зондування Землі: навч. посіб*. Київ: НАУ.

22. Кононов, В. І. (2004). *Основи дистанційного зондування: навч. посіб*. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна.

23. Кохан, С. С. (2011). *Дистанційне зондування: Основи, методи та засоби: навч. посіб*. Київ: НАУ.

24. Курач, Т. М. (2021). *Цифрове оброблення та дешифрування знімків: конспект лекцій*. Київ.

25. Ландсберг, Г. С. (1985). *Елементарний підручник фізики. Т. 1: Механіка. Теплота. Молекулярна фізика; Т. 2: Електрика і магнетизм; Т. 3: Коливання і хвилі. Оптика. Атомна і ядерна фізика*. Київ: Наука.

26. Лялько, В. І. (2002). Стан і перспективи розвитку аерокосмічних досліджень Землі в Україні. *Космічна наука і технологія, 2/3*, 29–35.

27. Лялько, В. І. (2006). *Аерокосмічні дослідження Землі в Україні: монографія*. Київ: Інститут географії НАН України.

28. Лялько, В. І., & Попов, М. О. (Ред.). (2004). *Словник із дистанційного зондування Землі*. Київ: СМП "АВЕРС".

29. Лялько, В. І., Федоровський, О. Д., & Попов, М. О. (2006). *Багатоспектральні методи ДЗЗ в задачах природокористування*. Київ: Наукова думка.

30. Манойлов, В. П. (2010). *Дистанційне зондування: навч. посіб*. Київ: НАУ.

31. Манойлов, В. П., Омельчук, В. В., & Опанюк, В. В. (2008). *Дистанційне зондування Землі із космосу: Науково-технічні основи формування й обробки видової інформації*. Житомир: ЖДТУ.

32. Миклуш, С. І., Гаврилюк, С. А., & Часьковський, О. Г. (2012). *Дистанційне зондування Землі в лісовому господарстві*. Львів: ЗУКЦ.

33. Неуймін, О. С., & Дяченко, С. М. (2010). ПЗЗ-матриці. *Вісник Національного технічного університету України "КПІ*№. Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування, 41, 182–190.

34. Пеньков, В. О. (2019). *Дистанційне зондування Землі та обробка даних: підручник*. Київ: КНУ.

35. Перелигін, Б. В. (2023). *Цифрова обробка зображень: Конспект лекцій*. Одеса: Одеський державний екологічний університет.

36. Перелигін, Б. В., & Гор'єв, С. А. (2021). *Цифрова обробка супутникових зображень: Конспект лекцій*. Одеса: Одеський держ. екологічний університет.

37. Попов, М. О. (2003). Шляхи одержання та використання космічної інформації в інтересах національної безпеки і оборони. *Наука і оборона, 2*, 38–50.

38. С'янов, О. М. (2024). *Конспект лекцій з дисципліни "Цифрове оброблення зображень" для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 172 "Електронні комунікації та радіотехніка" за освітньо-професійною програмою "Телекомунікації та радіотехніка"*. Кам'янське: ДДТУ.

39. Творошенко, І. С. (2015). *Цифрова обробка зображень: конспект лекцій*. Київ: НАУ.

40. Творошенко, І. С. (2017). *Конспект лекцій з дисципліни "Цифрова обробка зображень" для студентів 4 курсу денної форми навчання напряму 6.080101 – Геодезія, картографія та землеустрій*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.

41. Шилін, І. В. (2014). *Геоінформаційні технології в дорожньому будівництві: Конспект лекцій*.

42. Abramov, N. S., Makarov, D. A., Talalaev, A. A., & Fralenko, V. P. (2018). *Sovremennye metody intellektual'noi obrabotki dannykh DZZ* [Modern methods of intelligent processing of remote sensing data].

43. Antipov, O. I., Neganov, V. A., & Potapov, A. A. (2009). *Determinirovannyy khaos i fraktaly v diskretno-nelineynykh sistemakh* [Deterministic chaos and fractals in discrete-nonlinear systems]. Moscow: Radiotekhnika.

44. Asmus, V. V., Buchnev, A. A., & Pyatkin, V. P. (2009). *Klasternyi analiz i klassifikatsiya s obucheniem mnogospektral'nykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Cluster analysis and supervised classification of multispectral remote sensing data of the Earth]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies

45. Astashkin, A. A. (1991). *Sistemy, apparaty i pribory dlya resheniya zadach prirodopol'zovaniya i ekonomicheskogo kontrolya* [Systems, apparatus, and devices for solving problems of environmental management and economic control]. VINITI.

46. Atkinson, P., Cushnie, J. L., Townshend, J. R. G., & Wilson, A. (1985). Improving Thematic Mapper land cover classification using filtered data. *International Journal of Remote Sensing*, *6*(6), 955–961. URL: https://doi.org/10.1080/01431168508948523

47. Baklanov, A. I. (2009). *Sistemy nablyudeniya i monitoringa* [Observation and monitoring systems]. BINOM. Laboratoriya znanii.

48. Barrett, E., & Curtis, L. (1979). *Vvedenie v kosmicheskoe zemledelie* [Introduction to space agriculture]. Progress.

49. Bayer, B. E. (1976). *Color imaging array*. U.S. Patent 3,971,065. [Google Scholar].

50. Berliant, A. M. (Ed.). (2003). *Teoriia i praktika tsifrovoi obrabotki izobrazhenii: Distantsionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy: Uchebnoe posobie MGU* [Theory and practice of digital image processing: Remote sensing and geographical information systems: MGU textbook]. Nauchnyi mir.

51. Bibikov, S. A., Kazanskii, N. L., & Fursov, V. A. (2018). *Raspoznavanie rastitel'nogo pokrova na giperspektral'nykh izobrazheniyakh po pokazatelyu*

sopryazhennosti [Vegetation cover recognition in hyperspectral images by a conjunction indicator].

52. Bondarev, V. N., Trioster, G., & Chernega, V. S. (1999). *Tsifrovaia obrabotka signalov: metody i sredstva* [Digital signal processing: methods and means]. Sevastopol: SevGU.

53. Chandra, A. M., & Ghosh, S. K. (2008). *Distantsionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy* [Remote sensing and geographical information systems]. Tekhnosfera.

54. Cherepanov, A. S., & Druzhinina, E. G. (2009). Spektral'nye svoistva rastitel'nosti i vegetatsionnye indeksy [Spectral properties of vegetation and vegetation indices].

55. *Commercial Communications Satellites Geosynchronous Orbit*. (n.d.). URL: http://www.boeing.com/assets/pdf/defense-space/space/bss/launch/980031_002k.pdf.

56. Davis, Sh. M., et al. (1983). *Distantsionnoe zondirovanie: kolichestvennyi podkhod* [Remote sensing: a quantitative approach]. Nedra.

57. Distantionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa [Remote Sensing of the Earth from Space]. (2019). No. 1, 10. Moscow: Space Research Institute, Russian Academy of Sciences (IKI RAN.

58. Dougherty, E. R., & Lotufo, R. A. (2003). *Hands-on morphological image processing*. SPIE Optical Engineering Press.

59. Draper Prize page. (n.d.). http://www.nae.edu/Awards/DraperPrize.aspx

60. ERDAS, Inc. (2009). ERDAS field guide (7th ed.). Norcross, GA: Author.

61. Forsyth, D. A., & Ponce, J. (2004). Komp'yuternoye zreniye. Sovremennyy podkhod [Computer vision: A modern approach]. Izdatel'skii dom "Viliams".

62. Garbuk, S. V., & Gershenzon, V. E. (1997). Kosmicheskie sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Space systems for Earth remote sensing]. A i B.

63. Gonzalez, R., & Woods, R. (2006). Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Tekhnosfera.

64. Grigor'ev, A. A., & Kondrat'ev, K. Ya. (1985). *Kosmicheskoe zemlevedenie* [Space geography]. Nauka.

65. Gruzman, I. S., Kirichuk, V. S., & others. (2002). *Tsifrovaia obrabotka izobrazhenii v informatsionnykh sistemakh* [Digital image processing in information systems]. NGTU.

66. Hunt, B. R., & Cannon, T. M. (1976). Nonstationary assumptions for Gaussian models of images.

67. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *6*(12), 876–878. https://doi.org/10.1109/TSMC.1976.4309510.

68. Jahne, B. (2007). *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* [Digital image processing]. Tekhnosfera.

69. Kashkin, V. B., & Sukhin, A. I. (2001). *Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. Uchebnoe posobie* [Remote sensing of the Earth from space. Digital image processing. A textbook]. Logos.

70. Kienko, Y. P. (1999). *Osnovy kosmichnoho pryrodovedennya* [Fundamentals of cosmic nature studies]. Kartheotsentr-Heodezyzdat.

71. Knizhnikov, Y. F. (2014). Remote sensing and the challenges of aerospace training for university geographers-cartographers. *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography, (5),* 80–82.

72. Knizhnikov, Y. F., Kravtsova, V. I., & Tutubalina, O. V. (2004). *Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy* [Aerospace methods of geographical research]. Akademiya.

73. Kobernichenko, V. H., & Trenykhin, V. A. (2007). Metody syntezu izobrazheniy na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli razlichnoho razresheniya [Methods for synthesizing images based on Earth remote sensing data of different resolutions]. *Uspekhi radioelektroniky, 3*.

74. Kodak Truesense color filter improves on standard Bayer pattern. (2010, January). *Laser Focus World*.

75. Kondratenkov, G. S., & Frolov, A. Y. (2005). *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Radiovision. Radiolocation systems for Earth remote sensing]. Radiotekhnika.

76. Kondratyev, K. Y., & Fedchenko, P. P. (1982). *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' i raspoznavanie rastitel'nosti* [Spectral reflectance and vegetation recognition]. Hydrometeoizdat.

77. Kondratyev, K. Y., Kozoderov, V. V., & Fedchenko, P. P. (1986). *Aerokosmicheskie issledovaniya pochv i rastitel'nosti* [Aerospace studies of soils and vegetation]. Hydrometeoizdat.

78. *Kosmicheskie traektornye izmereniya: Radiotekhnicheskie metody izmerenii i matematicheskaya obrabotka dannykh* [Space trajectory measurements: Radiotechnical measurement methods and mathematical data processing]. (1969). Sovetskoe Radio.

79. Kozoderov, V. V. (2003). *Distantsionnoe zondirovanie Zemli: uchebnoe posobie* [Remote sensing of the Earth: A textbook]. Kiev: NTUU "KPI".

80. Kozoderov, V. V., & Kondranin, T. V. (2008). *Metody otsenki sostoyaniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova po dannym opticheskikh sistem distantsionnogo aerokosmicheskogo zondirovaniia* [Methods for assessing the state of soil and vegetation cover based on data from optical aerospace remote sensing systems]. MFTI.

81. Kravtsova, V. I. (2000). *Kosmicheskie metody kartografirovaniya* [Space methods of mapping]. Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta.

82. Kravtsova, V. K. (1995). *Kosmicheskie metody kartografirovaniya: Uchebnoe posobie* [Space methods of mapping: A textbook]. Moscow State University.

83. Kravtsova, V. K. (2005). *Kosmicheskie metody issledovaniya pochv: Uchebnoe posobie* [Space methods for soil research: A textbook]. Aspekt-Press.

84. Krinov, E. L. (1947). *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnykh obrazovanii* [Spectral reflectance of natural formations]. Izdatel'stvo AN SSSR.

85. Kronberg, P. (1988). *Distantsionnoe izuchenie Zemli. Osnovy i metody distantsionnykh issledovanii v geologii* [Remote study of the Earth. Fundamentals and methods of remote sensing in geology]. Mir.

86. Lebedev, A. A., & Nesterenko, O. P. (1991). *Kosmicheskie sistemy navedeniya* [Space guidance systems]. Mashinostroenie.

87. Lee, J. S. (1983). Digital image smoothing and the sigma filter. *Computer Vision, Graphics and Image Processing, 24*(2), 255-269.

88. Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC. (2005). ERDAS IMAGINE. Prakticheskoe rukovodstvo TourGuides.

89. Loupian, E. A., & Lavrova, O. Y. (2019). Results and highlights of the 17th All-Russia Open Conference with International Participation "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space".*Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 16*(6), 305–310.

90. Lurye, I. K., & Kosikov, A. G. (2003). *Teoriia i praktika tsifrovoi obrabotki izobrazhenii / Distantsionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy* [Theory and practice of digital image processing / Remote sensing and geographic information systems]. Moscow: Nauchnyy mir.

91. McDonnell, M. J. (1981). Box-filtering techniques. *Computer Graphics and Image Processing*, 17(3), 65–70. https://doi.org/10.1016/S0146-664X(81)80009-3

92. MapExpert (n.d.). Obrobka danykh DZZ – Etapy obrobky danykh [Remote sensing data processing – Stages of data processing]. URL: http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=26&table.

93. Marr, D. (1987). *Informatsionnyi podkhod k izucheniyu predstavleniya i obrabotki zritel'nykh obrazov* [An information-processing approach to the study of visual representation and processing]. Radio i sviaz'.

94. Mehta, N., Shahensha, S., Devireddy, R., & Ranjan Gartia, M. (2018). Single-cell analysis using hyperspectral imaging modalities. *J Biomech Eng*., 140(2).

95. Merrill, R. B. (1999). *Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure*. U.S. Patent No. 5,965,875.

96. Mikhailova, N. A., & Orlov, D. S. (1986). *Opticheskie svoistva pochv i pochvennykh komponentov* [Optical properties of soils and soil components]. Nauka.

97. Nagao M. & Matsuyama T. (1979). Edge preserving smoothing. *Computer graphics and image processing, 9*(4), 394–407.

98. Neizvestnyi, S. I., & Nikulin, O. Iu. (1999). Pribory s zaryadovoi sviaz'iu. Ustroistvo i osnovnye printsipy raboty [Charge-coupled devices. Device and basic principles of operation].

99. Nekhin, S. S. (Ed.). (2002). Instruktsiya po fotogrammetricheskim rabotam pri sozdanii tsifrovykh topograficheskikh kart i planov.[Instructions for photogrammetric works in the creation of digital topographic maps and plans]. TsNIIGAiK.

100. Pohl, C., & van Genderen, J. L. (1998). Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing, 19*(5), 823–854.

101. Popov, M. A., & Moiseev, V. L. (1999). *Fotogrammetricheskaya obrabotka i deshifrirovanie aerosnimkov. Chast' 1* [Photogrammetric processing and interpretation of aerial photographs. Part 1]. Kievskoe vysshee voennoe aviatsionno-tekhnicheskoe uchilishche. \

102. Pratt, W. (1982). *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* [Digital image processing]. Mir.

103. Pratt, W. K. (1991). Digital image processing (2nd ed.). Wiley-Interscience.

104. Press, F. P. (1991). *Fotochuvstvitel'nye pribory s zaryadovoi sviaz'iu* [Photosensitive charge-coupled devices]. Radio i sviaz'.

105. Programmnyy kompleks ENVI. (2007). *Programmnyy kompleks ENVI: Uchebnoe posobie* [ENVI software suite: A training guide]. Moscow: Sovzond.

106. Pudovkin, O. L. (2015). *Osnovy atmosfernoi optiki* [Fundamentals of atmospheric optics]. Otkrytaia platforma elektronnykh publikatsii SPUBLER.

107. PZS i optovolokno razdelili Nobelia po fizike. (2023, February 22). Habr. URL: https://habr.com/ru/articles/71734/

108. Ranchin T., Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Wald L. (2003). Image fusion. The ARSIS concept and some successful implementation schemes. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 58*, 4–18.

109. Rankulik, V. I., & Sitnikova, M. V. (1981). *Otrazhatel'nye svoistva i sostoyanie rastitel'nogo pokrova* [Reflective properties and state of vegetation cover]. Gidrometeoizdat.

110. *Retired Kodak Researcher Bryce Bayer Honored For Invention Enabling Color in Digital Imaging*. (2009, November 18). *M2PressWIRE*.

111. Rivas Casado, M., Ballesteros González, R., Greaves, J., & Waine, T. W. (2016). Using unmanned aerial vehicle (UAV) to monitor soil erosion in vineyards and olive groves: Contrasting 2.5 cm vs. 5 cm spatial resolution results. *Remote Sensing, 8*(8), 616.

112. Ryss, U. G. (2006). *Osnovy distantsionnogo zondirovaniya* [Fundamentals of remote sensing]. Tekhnosfera.

113. Savinykh, V. P. (1991). *Vizual'no-instrumental'nye issledovaniia Zemli s pilotiruemogo kosmicheskogo kompleksa* [Visual-instrumental studies of the Earth from a piloted space complex]. Nedra.

114. Savinykh, V. P., & Solomatin, V. A. (1993). *Optiko-elektronnye sistemy distantsionnogo zondirovaniia* [Optoelectronic remote sensing systems]. Nedra.

115. Shapiro, L., & Stokman, Dzh. (2006). *Komp'iuternoe zrenie* [Computer vision]. BINOM. Laboratoriia znanii.

116. Shovengardt, R. A. (2010). *Distantsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenii* [Remote sensing. Models and methods of image processing]. Tekhnosfera.

117. Skvortsov, A. V. (2002). *Triangulyatsiia Delone i ee primenenie* [Delaunay triangulation and its application]. Izdatel'stvo Tomskogo universiteta.

118. Sony. (2003, July 16). Realization of natural color reproduction in Digital Still Cameras, closer to the natural sight perception of the human eye. URL: https://www.sony.com/en/SonyInfo/News/Press/200307/03-029E/

119. Sorokina, N. P. (1976). Elementarnye pochvennye struktury na poliakh Kurskoi opytnoi stantsii [Elementary soil structures on the fields of the Kursk experimental station]. / *Krupnomasshtabnaia kartografiia pochv i ee znachenie v sel'skom khoziaistve chernozemnoi zony* [Large-scale soil mapping and its importance in the agriculture of the black earth zone] (pp. 155–173). Nauchnye trudy Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva.

120. Stankevich, S. A. (2002). K otsenke lineynogo razresheniya tsifrovykh aerokosmicheskikh snimkov [On the evaluation of linear resolution of digital aerospace images]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia*, *8*(2–3), 103–105.

121. Titarov, P. S. (2004). Prakticheskie aspekty fotogrammetricheskoi obrabotki skannernykh kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniia [Practical aspects of photogrammetric processing of high-resolution scanner space images]. *Informatsionnyi biulleten' GIS-Assotsiatsii* [Information Bulletin of the GIS Association], *3*(45), 25–26;

122. Tokareva, O. S. (2010). *Obrabotka i interpretatsiia dannykh distantsionnogo zondirovaniia Zemli* [Processing and interpretation of remote sensing data of the Earth]. Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.

123. Tolchel'nikov, Iu. S. (1974). *Opticheskie svoistva landshafta: Primenitel'no k aeros'emke* [Optical properties of the landscape: Applicable to aerial photography]. Nauka.

124. Trifonova, T. A., Mishchenko, K. V., & Krasnoshchekov, A. N. (2005). *Geoinformatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniia v ekologicheskikh issledovaniiakh: Uchebnoe posobie dlia vuzov* [Geoinformation systems of remote sensing in ecological studies: A textbook for universities]. Akademicheskii proekt.

125. Tu, Dzh., & Honsales, R. K. (1978). *Printsy py raspoznavaniia obrazov* [Principles of pattern recognition]. Mir.

126. Vinogradov, B. V., & Kondratyev, K. Y. (1971). *Kosmicheskie metody zemlevladeniya* [Space methods of land management]. Hydrometeoizdat.

127. Vizilter, Y. V., & Zheltov, S. Y. (2010). *Obrabotka i analiz izobrazheniy v zadachakh mashinnogo zreniya*: *Kurs lektsiy i prakticheskikh zanyatiy* [Processing and analysis of images in machine vision tasks: A course of lectures and practical classes].

128. Wayne, R. P. (1985). *Chemistry of atmosphere*. Oxford University Press.

129. Zraenko, S. M., Ivanov, O. Y., Sosnovskiy, A. V., & Trennikhin, V. A. (2013). *Obrabotka dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli: Prakticheskie aspekty* [Processing of remote sensing data of the Earth: Practical aspects]. Ural Federal University.

130. Zubarev, Y. V., & Dvorkovich, V. P. (1997). *Tsifrovaya obrabotka televizionnykh i komp'yuternykh izobrazheniy* [Digital processing of television and computer images]. International Center for Scientific and Technical Information.

Навчальне видання

Зацерковний Віталій Іванович,
Ворох Віктор Васильович

ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Навчальний посібник

Технічний редактор – І. П. Борис
Літературний редактор – О. М. Лісовець
Верстка, макетування – В. М. Косяк

Підписано до друку	Формат 60x84/16	Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman	Ум. друк. арк. 31,15	Тираж 100 прим.
Замовлення №	Обл.-вид. арк. 29,98	

ВИДАВНИЦТВО НДУ ім.М.В.ГОГОЛЯ

Ніжинський державний університет
імені Миколи Гоголя.
м. Ніжин, вул. Воздвиженська, 3-А
(04631) 7-19-72
E-mail: vidavn_ndu@ukr.net
www.ndu.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2137 від 29.03.05 р.

ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій Іванович,
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики Київського національного університету імені Тараса Шевченка.
Сфера наукових інтересів: геоінформаційні системи і технології, дистанційне зондування Землі, системний аналіз. Автор понад 320 наукових і методичних праць, серед яких 9 монографій, 7 навчальних посібників, 2 підручники, 14 патентів.
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

ВОРОХ Віктор Васильович,
асистент кафедри геоінформатики Київського національного університету імені Тараса Шевченка.
Сфера наукових інтересів: системи підтримки і прийняття рішень у складних системах, технології прецизійного землеробства, дистанційне зондування Землі.
e-mail: fainkucha@gmail.com