

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Конспект лекцій

АЕРОКОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ЕКОСИСТЕМ

по дисципліні „Аерокосмічний моніторинг екосистем”
для студентів 1 курсу

Спеціальність: 8.05010105 Комп'ютерний еколого-економічний моніторинг

“Затверджено”
на засіданні методичної комісії факультету КН
Декан факультету КН _____ Л.Б. Коваленко

“Узгоджено”
Декан факультету МАП _____ Г.О. Боровська

“Затверджено”
на засіданні кафедри АСМНС
протокол № __ від “__” _____ 2015 р.
Зав. кафедри _____ Б.В. Перелигін

ОДЕСА - 2015

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Одеський державний екологічний університет

Б.В. Перелигін

Аерокосмічний моніторинг екосистем

Конспект лекцій

Одеса
2015

ББК 32.97
П27
УДК 681.3 : 504.064.3

Друкується за рішенням Вченої Ради Одеського державного екологічного університету (протокол № від „ ” 2015 р.).

Перелигін Б.В.

П27 Аерокосмічний моніторинг екосистем: Конспект лекцій. / Перелигін Б.В.; Одеський державний екологічний університет. – Одеса, Видавництво ПП „ТЕС”, 2015 р. – 164 с.

В конспекті лекцій викладені основні поняття про фізичні і технічні основи одержання інформації про навколишнє середовище аерокосмічними методами, дається характеристика аерокосмічної інформації, описуються сучасні технічні засоби для одержання космічної інформації, розглядаються основи обробки космічних знімків, наводяться оптичні і радіаційні властивості екосистем, викладається порядок оцінки дистанційних індикаторів на основі теорії статистичних рішень, дається поняття про повну екосистемну індикаційну функцію. Як практичний приклад моніторингу наводиться аерокосмічний моніторинг агроекологічних систем.

Конспект лекцій призначений для магістрів, які навчаються за спеціальністю „Комп'ютерний еколого-економічний моніторинг”, а також може бути корисним для фахівців в галузі технічних систем моніторингу навколишнього середовища комп'ютерного, гідрометеорологічного та екологічного профілю.

ISBN

© Одеський державний
екологічний університет, 2015

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	5
1 Фізичні та технічні основи одержання інформації про навколишнє середовище аерокосмічними методами.....	8
1.1 Основні поняття про штучні супутники Землі.....	8
1.2 Методи пасивного і активного дистанційного зондування Землі.....	12
1.3 Можливості та фізичні особливості одержання аерокосмічної інформації.....	16
1.4 Технічні особливості одержання аерокосмічної інформації...	21
1.5 Космічні системи дистанційного зондування Землі.....	28
2 Характеристика аерокосмічної інформації.....	41
2.1 Основні види аерокосмічної інформації і вимоги, що ставляться до неї.....	41
2.2 Космічні знімки.....	43
2.3 Радіаційні, спектрометричні та мікрохвильові дані.....	48
3 Сучасні технічні засоби для одержання космічної інформації.....	50
3.1 Призначення, можливості і склад станції КОСМЕК.....	50
3.2 Програмне забезпечення і вимоги до комп'ютера.....	62
3.3 Характеристики та принцип роботи станції КОСМЕК.....	65
4 Основи обробки космічних знімків.....	69
4.1 Основні характеристики зображень на космічних знімках.....	69
4.2 Особливості зображень на космічних знімках у різних ділянках спектра.....	73
4.3 Етапи і зміст обробки космічних знімків.....	78
5 Оптичні та радіаційні властивості екосистем.....	102
6 Оцінка дистанційних індикаторів.....	111
7 Повна екосистемна індикаційна функція.....	120
8 Аерокосмічний моніторинг агроекологічних систем.....	128
8.1 Фактори, що впливають на врожайність і родючість ґрунтів..	129
8.2 Опорна апріорна інформація.....	133
8.3 Полігонна інформація.....	133

8.4	Паспорт підсупутникового тестового агрокосмічного полігона.....	135
8.5	Тематичне дешифрування факторів.....	140
8.5.1	Встановлення залежності між середньою урожайністю ранніх зернових і біопродуктивністю полігона.....	144
8.5.2	Визначення складу сільськогосподарських культур і калібрування врожайності ранніх зернових по окремих полях.....	145
8.5.3	Вивчення інформативних властивостей панхроматичного каналу космічного апарата Ресурс ДК1.....	146
8.6	Моделювання врожайності.....	152
8.7	Апаратно-програмні засоби обробки інформації дистанційного зондування Землі.....	154
8.8	Споживачі результатів агрокосмічного моніторингу.....	160
Література.....		163

ВСТУП

В останні десятиліття вплив людини на природу настільки підсилюється, що існуючі традиційні методи спостереження за її станом – стаціонарні дослідження, тематичне картографування і т.п. – перестали задовольняти сучасні вимоги обліку ресурсів біосфери та керування її розвитком. Це зв'язане в першу чергу зі зростаючою просторовою неоднорідністю біосфери, її динамічністю, розширенням площі трансформованих екосистем і появою екотехнічних систем. Як альтернатива традиційним методам спостереження за станом біосфери в умовах зростаючого антропогенного впливу на біосферу за останні два десятиліття розвивалася концепція моніторингу.

Слово „моніторинг” походить від латинського слова „monitor”, що перекладається як „спостерігаючий”, „застерігаючий”. Така семантика моніторингу добре відповідає сучасній концепції *екосистемного моніторингу* як системи спостереження за станом екосистем, реєстрації їх сучасної структури, контролю їх динаміки, головним чином антропогенної, прогнозу їх змін і, нарешті, керування та оптимізації.

Широке визначення моніторингу було сформульовано Секретаріатом ООН по навколишньому середовищу (SCOPE) на початку 1970-х років як „система повторних спостережень елементів навколишнього середовища в просторі й у часі з певною метою відповідно до заздалегідь підготовлених програм”. Саме ця концепція повторних спостережень стану екосистем покладена в основу програм досліджень навколишнього середовища. Нарешті, розвиток глобальних екологічних програм (програма „Людина і Біосфера”, Всесвітня програма кліматичних досліджень і ін.) вимагає вивчення геофізичних ефектів функціонування сучасних екосистем.

Об'єктом моніторингу є екосистеми, як природні, так і особливо антропогенні. *Екосистеми* – це безрозмірне поняття стійкої системи живих (біота) і неживих (зовнішнє й біотичне середовище) компонентів, у яких відбувається зовнішній і внутрішній круговорот речовини і енергії.

Для спостереження за станом екосистем і їх окремих компонентів з 30-х років XX століття використовуються авіаційні методи, а з 70-х років і космічні методи. У цей час аерокосмічні методи вивчення екосистем поєднуються під терміном *дистанційна індикація* (remote sensing) і включають безконтактну реєстрацію електромагнітного поля екосистем з вишок, вертольотів, літаків і супутників і інтерпретацію одержаних у такий спосіб даних для вивчення складу, структури, ритміки та динаміки екосистем.

Розвиток авіації і космонавтики дає все нові й нові відчутні результати. Переконливим підтвердженням цьому є перехід від окремих експериментів до повсякденного використання космічної техніки для

потреб господарювання. Успіхи в розвитку космічної техніки сприяли створенню й успішному функціонуванню космічних систем у різних країнах. З кожним роком усе більше відчувається соціально-економічна роль космічних досліджень і їх значення для науково-технічного прогресу.

На основі досягнень науки створюються нові служби, що відіграють важливу роль у господарській діяльності. Не менш важливе суспільне значення космічних досліджень і їх відбиття у свідомості людства. Вони поєднують і направляють зусилля народів багатьох держав на розв'язання першочергових задач, важливих для життя населення великих географічних районів і всієї земної кулі в цілому.

Сучасний *штучний супутник Землі (ШСЗ)*, призначений для *дистанційного зондування Землі (ДЗЗ)*, – це автоматична космічна обсерваторія, оснащена складним електротехнічним, оптико-механічним і радіоелектронним устаткуванням. Супутник оснащений апаратурою, що забезпечує одночасний вимір радіаційних потоків у різних ділянках спектра і одержання зображень хмарного покриву та підстильної поверхні у видимих, інфрачервоних променях і в радіодіапазоні.

Багаторічне функціонування супутників дистанційного зондування Землі дозволило накопичити значний досвід практичного використання супутникових спостережень, опрацювати та удосконалити методи їх обробки й інтерпретації в багатьох галузях.

Більші можливості надають *пілотовані космічні кораблі (ПКК)* і *орбітальні станції (ОС)* для проведення досліджень. Наявність на борту ПКК або ОС космонавта-дослідника дозволяє вирішувати завдання, які не можуть бути вирішені без участі людини. У цьому зв'язку є цікавим досвід спостережень із космосу.

ПКК і ОС дозволяють:

- більш швидко і економічно випробовувати апаратуру, яка потім може використовуватись на ШСЗ;
- виконувати разом з літаками та наземними засобами експерименти з відпрацювання нових систем ДЗЗ;
- виконувати спеціалізовані програми спостережень, пов'язані з охороною навколишнього середовища;
- забезпечувати можливість підтримки ефективного функціонування і ремонту апаратури майбутніх ШСЗ.

Однак, незважаючи на все сказане про космічні дослідження в екології, необхідно відзначити, що досвід використання супутників для спостережень із космосу з усією переконливістю відкинув необґрунтовані надії на повну заміну системи звичайних спостережень дистанційними методами. Саме тому передбачається спільне використання звичайних (прямих) і супутникових (дистанційних) спостережень.

Рік у рік зростає кількість держав, зацікавлених в одержанні інформації, добутої засобами космонавтики. Міжнародне співробітництво

покликано надати допомогу тим країнам, які в силу тих або інших причин ще не включилися в проведення космічних досліджень. Але, щоб співробітництво в області освоєння космосу було максимально корисним, між державами повинна існувати домовленість про принципи використання космічного простору.

Основи правопорядку в космосі вже визначені рядом міжнародних угод. Головна з них – Договір про принципи діяльності держав з дослідження та використання космічного простору, включаючи Місяць і інші небесні тіла. Цей договір, розроблений в Організації Об'єднаних Націй і ратифікований парламентами більш ніж 70 держав – членами ООН, іноді називають конституцією міжнародного космічного права.

Договір проголошує свободу в дослідженні космічного простору всіма державами. Але щоб свобода не перетворилася на сваволю, договір забороняє запуски космічних апаратів зі зброєю масового знищення. Заборонене також національне присвоєння окремих частин космічного простору і небесних тіл.

1 ФІЗИЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ОДЕРЖАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ АЕРОКОСМІЧНИМИ МЕТОДАМИ

1.1 Основні поняття про штучні супутники Землі

Використання штучного супутника Землі (ШСЗ) для наукових і прикладних цілей потребує знання закономірностей його руху. Вибір параметрів орбіти дозволяє заздалегідь розрахувати тривалість існування супутника, а також спрогнозувати можливість спостереження за ШСЗ із Землі та огляду Землі із супутника. Нарешті, для географічної прив'язки всіх спостережень бажано встановити каталоги координат супутника для послідовних моментів часу, причому важливо мати ці каталоги вперед на тривалий час.

Поняття про рух ШСЗ. Шлях, описуваний супутником у просторі, називається траєкторією. Траєкторію супутника прийнято ділити на характерні ділянки (рис. 1.1): A_0M_0 – ділянка виведення на орбіту; M_0M_K – ділянка орбітального польоту; M_KM_{Π} – ділянка входу в атмосферу, зниження та посадки. За допомогою ракети–носія на ділянці виведення супутник розганяється до заданої швидкості (вектор якої спрямований під заданим кутом до горизонту та до місцевого меридіана) і виводиться в задану точку простору. Параметри заданої точки є початковими умовами для наступної орбітальної ділянки польоту і однозначно визначають орбіту супутника. Ділянка траєкторії, на якій політ здійснюється із працюючим ракетним двигуном, називається *активною ділянкою*. Рух супутника на ділянці зниження та посадки здійснюється при закінченні його експлуатації.

Рух супутника відносно Землі відбувається на ділянці орбітального польоту в орбітальній площині. Цей рух описується законом Кеплера.

Незбуреним Кеплеровим рухом називають такий рух матеріальної точки, який відбувається під дією тільки однієї центральної сили гравітаційного притягання, величина якої обернено пропорційна квадрату відстані до притягуваного центра O . Центральне притягувальне тіло розглядається як тіло сферичної структури. У цьому випадку його гравітаційне поле збігається із центральним полем точки, що притягає.

Однак на політ супутника впливають фактори, які спричиняють відхилення від Кеплерового руху. До цих факторів можна віднести додаткові сили притягання Землі, зумовлені її не сферичністю, сили притягання Місяця, Сонця та інших планет, аеродинамічні та електромагнітні сили, світловий тиск і ін. Дія цих сил або постійна, або змінюється в міру переміщення супутника по орбіті. Перераховані сили називаються *збурювальними постійно діючими силами*.

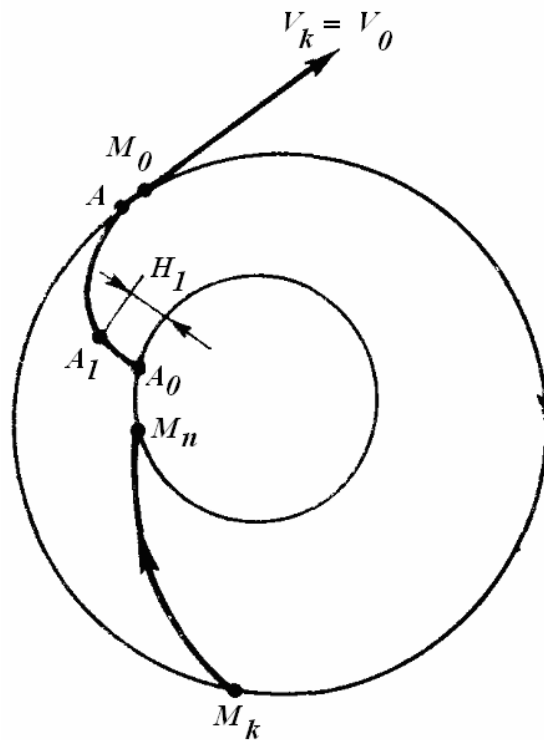


Рис. 1.1 – Траєкторія космічного польоту

Крім того, в орбітальному польоті ШСЗ може зазнавати ударів метеоритних тіл, притягання інших ШСЗ, короточасних гальмових або прискорювальних імпульсів при включенні бортових реактивних двигунів і т.п. Такі збурювальні сили *називаються миттєвими або імпульсними*.

Постійно діючі та імпульсні збурювальні сили приводять до того, що дійсні параметри руху ШСЗ по орбіті відрізняються від параметрів, розрахованих за формулами Кеплерового руху. Відмінність дійсних параметрів від розрахункових прийнято називати збурюванням, а сам рух ШСЗ під дією хоча б однієї збурювальної сили – *збуренням*.

Всі збурювання поділяються на *вікові й періодичні*. Вікові збурювання безупинно змінюють елементи орбіти супутника пропорційно часу. Періодичними називаються такі збурювання, значення яких повторюються через певний інтервал часу. Вони поділяються на *короткоперіодичні й довгоперіодичні*.

Елементи орбіти ШСЗ. Рух матеріальної точки по незбуреній Кеплеровій орбіті буде однозначно визначеним, якщо будуть задані *елементи орбіти*, а саме:

- параметри, що визначають розміри і форму орбіти;
- площа, у якій розташовується орбіта;
- параметри, що характеризують орієнтацію орбіти в цій площині;
- а також момент часу проходження рухомої точки через певну

точку орбіти (або положення рухомої точки на орбіті в заданий момент часу).

Елементи вводяться для деякої системи координат, початок якої збігається із центром, що притягає, а осі зберігають незмінні напрямки в просторі так, щоб добове і річне обертання Землі спричинили найменшу зміну координат цієї площини. За основну площину обирають звичайно або площину екліптики певної епохи, або площину земного екватора, а вісь абсцис направляють у точку весняного рівнодення на екваторі (точку Овна γ).

Нехай $P_N P_S$ – вісь світу, щодо якої побудована небесна сфера, де показані екватор і точка Овна (рис. 1.2).

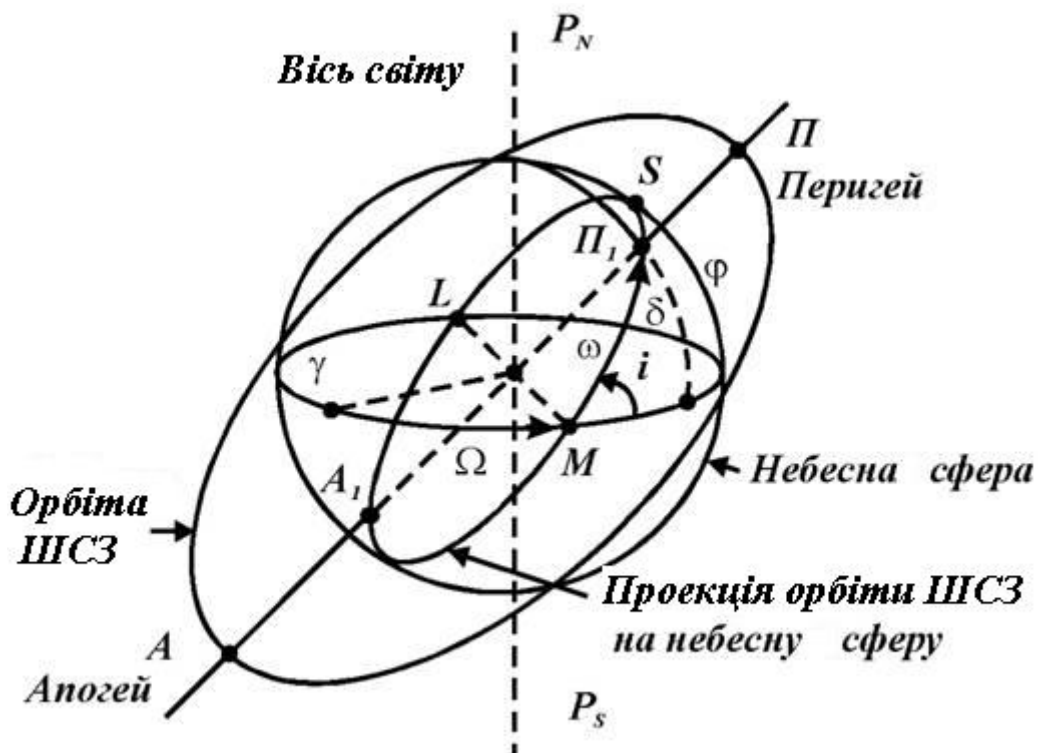


Рис. 1.2 – Елементи орбіти супутника

Проведемо через центр сфери площину орбіти і у цій площині побудуємо еліптичну орбіту ШСЗ так, щоб один з її фокусів потрапив у точку центра. Точки А и П будуть відповідно апогеєм і перигеєм орбіти. Проекцією орбіти на небесну сферу буде велике коло $A_1 M P_1 L$, по якому площина орбіти перетинає сферу. Точки перетину цього кола з екватором М і L називаються вузлами орбіти – висхідним і спадним, а лінія ML – лінією вузлів. Апогей і перигей проектується на сферу в точках A_1 і P_1 (апоцентр і перицентр), лінія $A_1 P_1$ носить назву лінії апсид.

Положення орбіти в просторі задається двома елементами:

1. Нахилення (нахил) площини орбіти до основної площини –

двогранний кут між площиною орбіти і площиною екватора, відлічуваний від площини екватора проти ходу годинникової стрілки для спостерігача, що перебуває в точці висхідного вузла. Позначається нахилання площини орбіти звичайно буквою i та змінюється від 0° до 180° .

2. Довгота висхідного вузла Ω – кут, розташований в екваторіальній площині та відлічуваний від напрямку на точку весняного рівнодення γ до лінії вузлів ML, тобто лінії перетину площини орбіти із площиною екватора. Висхідним вузлом М орбіти називають точку, у якій тіло переходить із південної півкулі в північну півкулю; протилежна точка L називається спадним вузлом. Довгота висхідного вузла змінюється від 0° до 360° .

Орієнтація еліпса в площині орбіти визначається одним елементом:

3. Аргумент перигею або кутова відстань від вузла – кутова відстань перицентра, позначувана через ω , є кут між лінією вузлів і лінією апсид; інакше кажучи, притягувальний кут з вершиною в центрі між напрямками на висхідний вузол і перицентр орбіти. Аргумент перигею змінюється в межах від 0° до 360° .

Характеристики еліпса орбіти задаються двома елементами:

4. Більша піввісь орбіти a . Розміри орбіти задаються значенням півосі еліпса, наприклад, значенням його великої півосі a : $a = 1/2$ АП.

5. Ексцентриситет орбіти e : $e = c/a$.

Часовий параметр орбіти – один часовий параметр:

6. Момент $t(t_0)$ проходження точки, що рухається, через перицентр (перигей) орбіти або через висхідний вузол.

Наведена система елементів орбіти – одна з можливих. Іноді замість моменту проходження через перицентр задають інший елемент – середню аномалію M_0 в епоху t_0 (звичайно t_0 – початковий момент часу), замість великої півосі користуються фокальним параметром P і т.д.

Орбіти ШСЗ. Орбіти ШСЗ залежно від значення їх параметрів можуть дуже різнитися між собою. Проте існує кілька основних ознак, за якими орбіти поділяються на характерні типи. У якості таких ознак беруться значення:

- ексцентриситету e ,
- нахилання орбіти i ,
- періоду обігу T ,
- висоти H .

Ексцентриситет e визначає форму орбіти: $e = 0$ – колова орбіта, $e < 1$ – еліптична, $e = 1$ – параболічна, $e > 1$ – гіперболічна орбіта. Найбільший інтерес для космічних методів дослідження становлять колові та еліптичні орбіти. Перші з них застосовують переважніше при запуску супутників ДЗЗ.

У відповідності зі значенням нахилання орбіти супутники діляться на

екваторіальні ($i = 0^\circ$), похилі ($0^\circ < i < 90^\circ$) і полюсні або полярні ($i = 90^\circ$) (рис. 1.3).

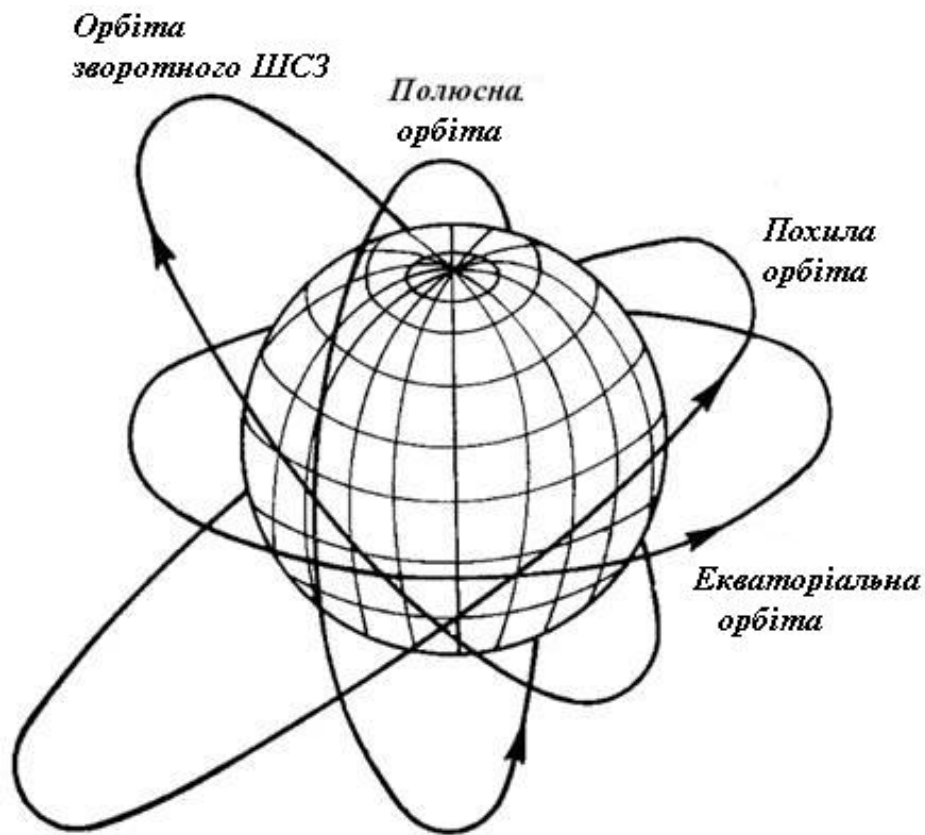


Рис. 1.3 – Основні типи орбіт ШСЗ

Екваторіальний супутник буде завжди пролітати над екватором. При висоті орбіти 35786 км над рівнем моря період оберту ШСЗ зрівняється із зоряним періодом обороту Землі. Супутник буде обертатися з такою ж кутовою швидкістю, що й Земля, і, переміщаючись по орбіті в напрямку, що збігається з напрямком обертання Землі, буде увесь час перебувати над тим самим наземним пунктом. Такий ШСЗ називається *стаціонарним*. Екваторіальні супутники спостерігаються в смузі уздовж екватора, причому, чим вища орбіта, тем ширша ця смуга.

Витки полюсного ШСЗ при кожному новому оберті через обертання Землі будуть *зміщатися до заходу*. Такі супутники будуть спостерігатися в будь-якому пункті земної поверхні в той або інший час.

Похилі ШСЗ проектується на поверхню Землі тільки в межах широт $\Delta\varphi = \pm i$.

Усі ШСЗ можуть розділятися на *прямі* й *зворотні*. Прямі рухаються в напрямку обертання Землі із заходу на схід, для них $0^\circ \leq i \leq 90^\circ$; зворотні – зі сходу на захід і для них $90^\circ < i < 180^\circ$.

Прямі супутники запускати легше, тому що при їхньому виведенні на

орбіту до швидкості ракети додається лінійна швидкість обертання Землі.

При запуску зворотних супутників лінійна швидкість обертання Землі віднімається від швидкості ракети.

Штучні супутники Землі розділяються також на *періодичні* та *неперіодичні*. Період обертання перших кратний періоду обертання Землі. В зв'язку з цим положення супутника щодо поверхні Землі повторюється щодобово. Неперіодичні супутники цієї властивості не мають.

За висотою орбіти ШСЗ можуть поділятися на три групи: *низькоорбітальні*, *середньоорбітальні* та *високоорбітальні*. У першу групу включені супутники, що запускаються на висоти 200...500 км. До них відносяться пілотовані космічні кораблі, орбітальні космічні станції, окремі супутники серії „Космос” і інші літальні апарати. Друга група представлена супутниками, що запускаються на висоти від 500 до декількох тисяч кілометрів. На цих висотах літають супутники метеорологічного, геодезичного, астрономічного призначення, а також інші ШСЗ дистанційного зондування Землі. До третьої групи відносяться супутники з висотою польоту в десятки тисяч кілометрів. Ці висоти використовуються для запуску метеорологічних стаціонарних супутників, технологічних ШСЗ, місячних автоматичних і пілотованих космічних кораблів і інших апаратів.

Орбіти супутників дистанційного зондування Землі (СДЗЗ). Основна перевага спостережень із супутників полягає в можливості одержувати інформацію про стан всієї (або майже всієї) території земної кулі, а також здійснювати безперервне простежування процесів на певних більших ділянках Землі.

Для СДЗЗ вибір орбіти має велике значення. У зв'язку із цим до їхніх орбіт ставляться певні вимоги, основними з яких можуть бути такі:

- а) забезпечення широкої смуги огляду із супутника;
- б) надання можливості одержання космічних знімків з високою роздільною здатністю;
- в) забезпечення необхідної для спостережень періодичності;
- г) одержання даних над конкретним географічним районом у певний час.

Ці досить тверді вимоги можуть бути задоволені шляхом вибору висоти, форми й нахилу орбіти, а також шляхом визначення *оптимального часу запуску СДЗЗ*:

- 1) для максимального охоплення земної поверхні спостереженнями оглядовою апаратурою застосовуються *полярні орбіти*;
- 2) для одержання зображень над певним районом Землі в один той самий місцевий час, який залежить від часу запуску СДЗЗ, використовують так звані *сонячно-синхронні орбіти*, площина яких повертається синхронно із обертанням Землі навколо Сонця в східному напрямку зі швидкістю 0,986 градуса за добу. Орбітальна

площина супутника повинна бути компланарна з напрямком Земля – Сонце. Необхідна швидкість прецесії забезпечується при запуску вибором відповідного кута нахилу орбіти до екватора. Ці міркування лежать в основі вибору орбіт ряду метеорологічних супутників і СДЗЗ. Супутники, що перебувають на *зворотних похилих сонячно-синхронних орбітах*, перебувають над певною точкою земної поверхні в один той самий місцевий час, значення якого залежить від часу запуску. Ці переваги є важливими при розв'язанні ряду задач за матеріалами супутникових спостережень;

- 3) велике значення при спостереженнях зі СДЗЗ має *детальність спостережень*, тобто розрізнення необхідних деталей при заданій смузі огляду. Ця обставина визначає вибір висоти орбіти СДЗЗ. Зі збільшенням висоти польоту смуга огляду збільшується, а детальність спостережень погіршується. Тому при необхідності одержання підвищеної детальності спостережень (зображень) частіше використовуються середньоорбітальні СДЗЗ із висотою польоту 600...1500 км, для збору узагальненої інформації з великої площі звичайно використовуються супутники, що мають висоту орбіти $H=36000$ км;
- 4) для спостережень використовуються *колові* або близькі до них орбіти. Вони забезпечують спрощення географічної прив'язки, обробки та аналізу супутникової інформації;
- 5) при виборі орбіт супутників ураховується, що глобальні спостереження повинні виконуватися, принаймні, 2 рази на добу. Час запуску визначається таким чином, щоб забезпечити збір максимальної інформації над тим або іншим районом, при цьому час намагаються узгодити зі строками наземних спостережень із метою *синхронного спільного аналізу* даних;
- 6) при запуску декількох супутників дуже важливо, щоб їх *орбіти* були *взаємозалежні*. Ця вимога дозволяє розв'язати комплекс завдань, пов'язаних із глобальними спостереженнями.

1.2 Методи пасивного і активного дистанційного зондування Землі

Залежно від природи реєстрованого електромагнітного випромінювання дистанційне зондування Землі може здійснюватися *пасивними і активними методами*.

Пасивні методи засновані на вимірі характеристик поля власного теплового випромінювання досліджуваних об'єктів і (або) відбитого ними сонячного випромінювання. Інтенсивність (яскравість) цього випромінювання є в загальному випадку функціоналом полів температури, вологості, тиску, концентрації озону та інших малих газових складових

атмосфери, водяного і фазового складу хмар, параметрів опадів, вологості підстильної поверхні, характеристик рослинного, снігового та крижаного покривів і т.д. і залежить від частоти, поляризації і кута візування.

За допомогою СДЗЗ можна реалізувати **три методи** пасивного дистанційного зондування, які засновані на вимірах:

- відбитої та розсіяної системою підстильна поверхня – атмосфера (СППА) сонячної радіації;
- власного теплового випромінювання СППА;
- прозорості атмосфери за природними джерелами випромінювання.

Фізичною основою **першого методу** є залежність відбитого та розсіяного сонячного випромінювання від багатьох фізичних параметрів атмосфери та підстильної поверхні (геометричні розміри, водяний і фазовий склад хмар, характеристики аерозолі, стан поверхні акваторій, рослинного, крижаного та снігового покривів і т.д.).

Фізична основа **другого методу** пасивного зондування аналогічна першому, але тільки тут ідеться про залежність від гідрометеорологічних параметрів власного теплового випромінювання СППА. До перерахованих вище параметрів ще слід додати температуру – верхньої межі хмар, поверхні океану та материкових покривів, температуру повітря на різних висотах. Залежність оптичної густини атмосфери від частоти приводить до того, що із частотою змінюється відносний внесок різних шарів атмосфери (при зондуванні лімба – різних ділянок на трасі зондування) в інтенсивність реєстрованого на супутнику власного випромінювання, що є основою для оцінки висотних профілів метеорологічних елементів.

Третій метод базується на використанні принципів абсорбційної спектроскопії і пов'язаний зі спектральними вимірами електромагнітного випромінювання від зовнішнього (природного або штучного) джерела. Такі виміри дозволяють визначити осереднену оптичну характеристику атмосфери на трасі джерело випромінювання–прилад, її спектральну прозорість. Залежність спектральної прозорості атмосфери від параметрів атмосфери і становить фізичну основу цього методу.

При **активному зондуванні** (радіо– і лазерна локація) джерело випромінювання (передавач) розташоване на супутнику. Потужність, фаза, частота та інші характеристики відбитого (розсіяного) випромінювання, генерованого цим джерелом, також визначаються перерахованими вище параметрами атмосфери та підстильної поверхні. Власне випромінювання Землі та відбите сонячне випромінювання в цьому випадку будуть перешкодою.

Активне зондування за допомогою ШСЗ може здійснюватися з використанням **двох методів**, заснованих на вимірах:

- відбитого і розсіяного СППА випромінювання від активного джерела;

– прозорості атмосфери.

У цей час більшість пристроїв для зондування Землі з космосу являють собою чутливі приймачі випромінювання (пасивне зондування). Активні методи дистанційного зондування поки ще не набули широкого практичного застосування, що зумовлено головним чином великим енергоспоживанням радіолокаційних станцій (РЛС) і лідарів. Однак з ростом потужності бортових джерел живлення роль активних методів зондування СППА з космосу суттєво зростає.

1.3 Можливості та фізичні особливості одержання аерокосмічної інформації

Дистанційне зондування навколишнього середовища являє собою сукупність методів виміру параметрів фізичного стану підстильної поверхні і атмосфери за допомогою приладів, розташованих на деякій відстані від об'єктів дослідження. Дистанційні дослідження проводяться з різних вимірювальних платформ: СДЗЗ, літаків, аеростатів, суден, а також з поверхні Землі. На відміну від контактних (прямих) вимірів, коли вимірювальне обладнання перебуває в безпосередньому зіткненні з досліджуванним об'єктом середовища, прилади дистанційного (непрямого) зондування одержують інформацію про середовище шляхом виміру ефектів взаємодії з нею різних випромінювань. Стосовно до моніторингу найбільш важливим є взаємодія із середовищем електромагнітного випромінювання.

Джерелом інформації при спостереженні Землі з космосу є просторові, часові та кутові варіації інтенсивності електромагнітних хвиль, відбитих або випромінених системою підстильна поверхня – атмосфера (СППА). Вимір характеристик поля електромагнітного випромінювання на різних довжинах хвиль λ є основою для оцінки параметрів фізичного стану атмосфери, океану, материкових покривів.

Для проведення спостережень за допомогою СДЗЗ можуть застосовуватись прилади, що реєструють випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 мкм до 1 м.

Цей широкий проміжок спектра прийнято підрозділяти на ряд піддіапазонів:

0,3...0,4 мкм – близький ультрафіолетовий (УФ),
0,4...0,76 мкм – видимий,
0,76...1,5 мкм – близький інфрачервоний (ІЧ),
1,5...1000 мкм – середній і далекий (ІЧ),
1 мм...1 м – надвисокочастотний (НВЧ), називають також мікрохвильовим (рис. 1.4).

Можливості та фізичні особливості дистанційного зондування Землі залежать від використовуваного діапазону довжин хвиль.

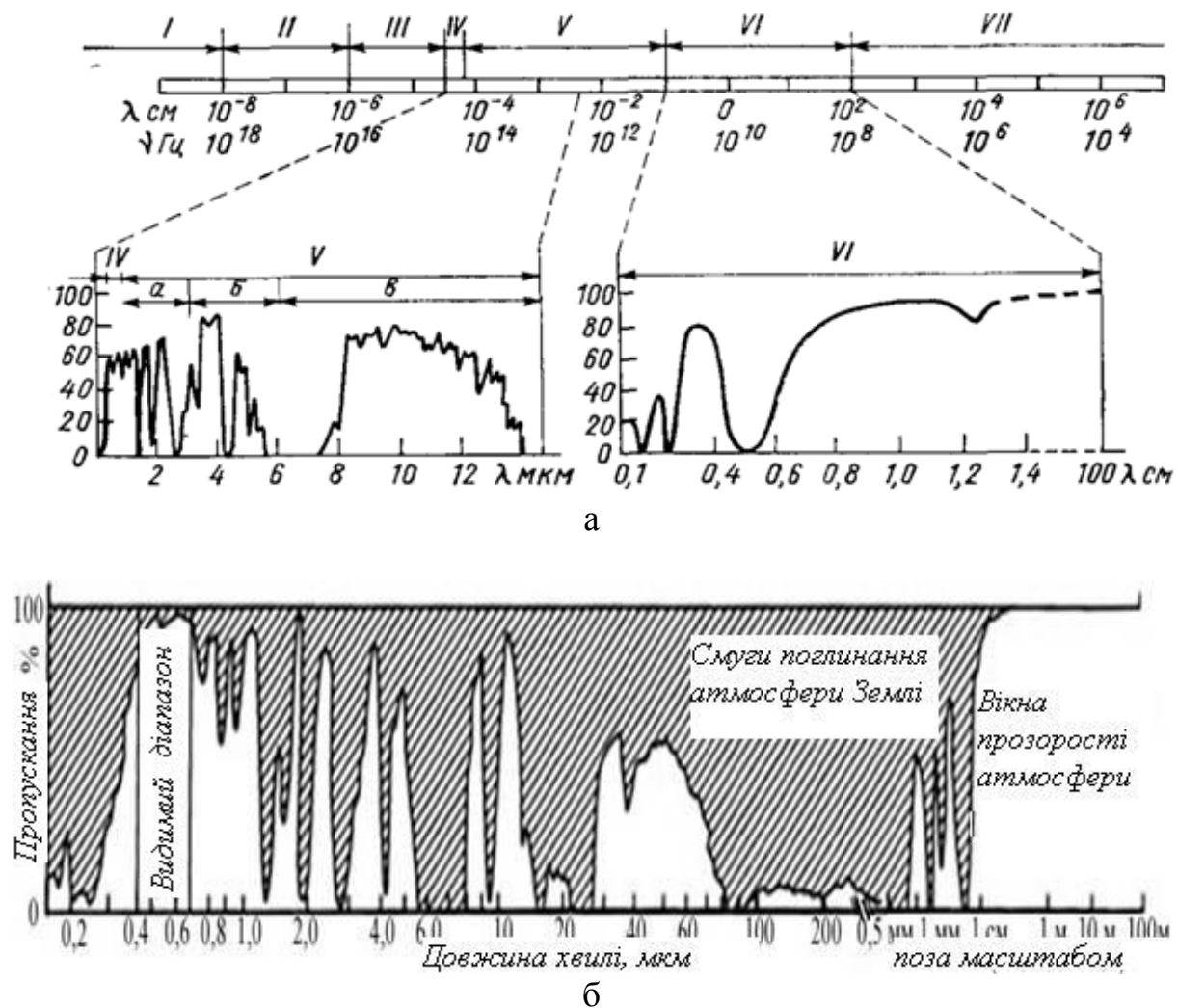


Рис. 1.4 – Спектри електромагнітного випромінювання та пропускання безхмарної стандартної атмосфери
Випромінювання: I – гама, II – рентгенівське, III – УФ, IV – видиме, V – ІЧ (зони: а – близька, б – середня, в – далека), VI – НВЧ, VII – радіо

Через ефект розсіювання променів в атмосферному серпанку, що найбільше сильно проявляється в синій й блакитній зонах спектра (0,38...0,5 мкм), знижується контраст зображення, спотворюється колір об'єктів. Тому в сучасному дистанційному зондуванні при зйомці поверхні Землі блакитний діапазон практично використовується мало.

Для цілей ДЗЗ використовується діапазон електромагнітних хвиль від більш ніж 0,4 мкм до 30 м. Зйомка проводиться не у всьому цьому діапазоні, а в окремих зонах спектра, де є „вікна прозорості” атмосфери (тобто спектральні області, де коефіцієнт пропускання атмосфери досить високий).

На **світловий діапазон** (0,4...3,0 мкм) припадає основна частина сонячної енергії пропущеної атмосферою. Цей діапазон довжин хвиль

складається з видимого (0,4...0,76 мкм), де здатне бачити око людини, і близького інфрачервоного (0,76...3,0 мкм). Одержувані у світловому діапазоні зображення найчастіше виглядають досить „натурально” щодо зорового сприйняття. Тому в цій зоні спектра формуються детальні зображення земної поверхні, використовувані для цілей картографування в різних масштабах. У світловому діапазоні працюють фотографічні, телевізійні, деякі інфрачервоні та лазерні системи ДЗЗ.

У видимому і близькому ІЧ діапазонах джерелом інформації про параметри СППА є відбите сонячне випромінювання. Тому спостереження можуть здійснюватися на освітленій стороні планети. Однак активне лазерне зондування на цих довжинах хвиль передбачається виконувати переважно в нічні години, оскільки вдень відбите сонячне випромінювання є заважальним фактором.

Середній і далекий ІЧ діапазони спектра представлено двома „вікнами прозорості”: 3...5 мкм і 8...14 мкм. На ці довжини хвиль припадає максимум власного теплового випромінювання Землі. Оскільки різні об'єкти, розташовані на земній поверхні, мають різні випромінювальні властивості, у цих діапазонах виходять знімки, що відображають теплову карту земної поверхні. Одержувані знімки зберігають форму природних об'єктів, однак 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 випромінювання об'єктів земної поверхні, моніторинг мереж теплопостачання в місті і т.д. У цьому спектральному діапазоні дистанційне зондування виконується ІЧ і лазерними системами.

В ІЧ і НВЧ діапазонах довжин хвиль вимірювання можуть проводитися незалежно від часу доби.

При виконанні ДЗЗ у **радіодіапазоні** використовуються 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 (у цьому випадку здійснюється опромінення земної поверхні з борту носія). Зйомка виконується радіотехнічними станціями, радіолокаційними станціями бічного огляду (РЛСБО), але найчастіше радіолокаторами із синтезованою апертурою антени (РСА).

Схематично огляд поверхні за допомогою РСА, встановленого на літальному апараті, показаний на рис. 1.5. За напрямком польоту ефективна довжина антени значно більша, чим у вертикальному напрямку. Відповідно діаграма направленості антени в горизонтальній площині більш вузька, ніж у вертикальній площині. На рисунку показана площа огляду, яка відповідає миттєвому положенню літального апарата й смугі огляду, що утворюються в результаті його руху. Радіолокаційне зондування за

допомогою РСА засноване на *голографічних принципах* у радіодіапазоні. *Голографією* називається метод реєстрації і наступного відновлення фронту електромагнітної хвилі, що передбачає безперервну реєстрацію не тільки інтенсивності хвилі, а й форми хвильового фронту в цілому. Картина хвильового фронту може фіксуватися в роздріб (не миттєво, а зі зсувом у часі), але відтворюється вона відразу, в один момент часу.

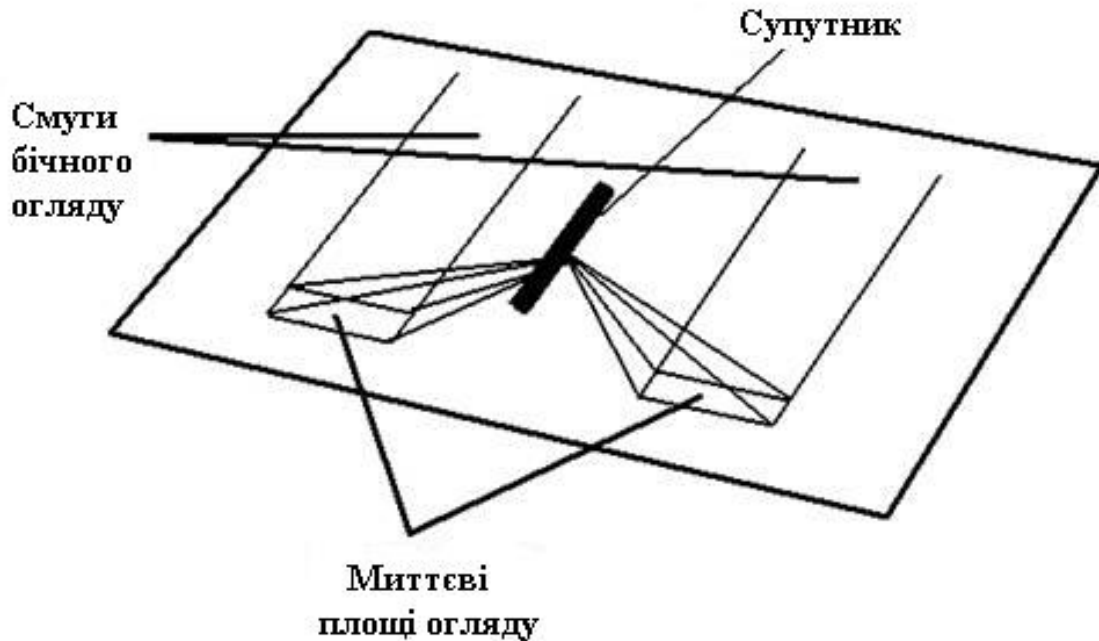


Рис. 1.5 – Принцип роботи радіолокатора із синтезованою апертурою антени

Одержувані зображення використовуються для моніторингу крижаних покривів, дослідження водних поверхонь і розв'язання інших завдань. Особливо перспективне використання цих матеріалів для одержання інформації про рельєф земної поверхні.

Хмарність перешкоджає вивченню характеристик підхмарних шарів атмосфери, підстильної поверхні у видимій та ІЧ ділянках спектра. У НВЧ діапазоні хмарність – напівпрозоре середовище, що дозволяє за даними дистанційних вимірів оцінювати як властивості земної поверхні, так і параметри самої хмарності.

Залежно від використовуваного діапазону змінюється і **просторова роздільна здатність** приладів дистанційного зондування. За інших рівних умов найвище розрізнення досягнуто у видимому діапазоні довжин хвиль (десятки сантиметрів...одиниці кілометрів), а найнижче – у НВЧ (одиниці...десятки кілометрів). В ІЧ діапазоні розрізнення становить одиниці метрів...кілометри.

При роботі в активному режимі високе розрізнення досягається в

радіолокаційних станціях із синтезованою апертурою. РСА випромінює сигнали, частота яких підтримується з високою точністю (когерентні сигнали). Спеціальна обробка відбитих радіолокаційних сигналів дозволяє реалізувати при вимірах із супутників розрізнення у кілька десятків метрів.

При розв'язанні різних завдань дистанційного зондування великого значення набуває **ступінь ослаблення електромагнітного випромінювання середовищем**. Навіть під час відсутності хмарності та опадів атмосферні гази (насамперед, водяна пара, вуглекислий газ і озон) послаблюють електромагнітне випромінювання, що поширюється в атмосфері. Це значно заважає зондуванню підстильної поверхні і нижніх шарів атмосфери з космосу. Ослаблення електромагнітного випромінювання атмосферою змінюється по спектру в дуже широких межах. Мінімальних значень воно досягає у видимому діапазоні довжин хвиль, у декількох вікнах прозорості атмосфери, розташованих у близькій та середній ІЧ ділянках спектра, а також у НВЧ діапазоні, за винятком областей резонансного поглинання водяної пари ($\lambda = 1,64$ мм) і кисню ($\lambda = 2,53$ мм і $\lambda = 5...6$ мм).

Можливість одержання інформації не тільки про властивості підстильної поверхні, але і про те, як вони змінюються в ній із глибиною, залежить **від глибини** проникнення L електромагнітної хвилі в середовище. (Глибиною проникнення називається така глибина, на якій потужність сигналу слабшає в e раз.) Глибина проникнення визначається оптичними константами середовища, у якому поширюється хвиля. При наявності в середовищі частинок, що розсіюють, значення L буде також залежати від властивостей цих часток.

Для хвиль видимого діапазону найбільші значення глибини проникнення характерні для льоду і води, де вони становлять десятки сантиметрів – десятки метрів залежно від λ . Величина L значною мірою залежить від наявності у воді фітопланктону, суспензій, різного виду забруднень. Глибина проникнення видимого світла в материкові покриви дуже мала.

В ІЧ діапазоні все випромінювання формується в дуже тонкому поверхневому шарі.

Електромагнітні хвилі НВЧ діапазону сильно поглинаються водною поверхнею; тут значення L варіюють від сотих часток до одиниць міліметра. У той же час у сухих ґрунтах, у материкових льодах, сухому снігу значення L можуть досягати декількох десятків значень λ , що, наприклад, для хвиль сантиметрового і міліметрового діапазонів становить одиниці – десятки метрів. Така більша глибина проникнення НВЧ випромінювання є основою для дистанційного вивчення властивостей ґрунтів, гірських порід, крижаного й снігового покривів до значної глибини.

1.4 Технічні особливості одержання аерокосмічної інформації

Супутник, призначений для моніторингу – це космічна автоматична обсерваторія або *космічна система дистанційного зондування Землі* (КСДЗ), оснащена складним електротехнічним, оптико-механічним і радіоелектронним устаткуванням виміру, запам'ятовування та передачі інформації. Її комплекс бортової апаратури можна умовно поділити на комплекс наукової апаратури і комплекс службової апаратури.

Комплекс наукової апаратури призначений для одержання моніторингової інформації.

Комплекс службової апаратури призначений для підтримки нормального функціонування наукової апаратури і всього супутника в цілому.

Залежно від завдань, поставлених перед вимірами, комплекс наукової апаратури може містити в собі системи вимірів, що працюють у різних діапазонах електромагнітного спектра. Для супутників, що забезпечують одержання регулярної інформації, найбільше застосування одержали виміри у видимому, інфрачервоному та мікрохвильовому (НВЧ) діапазонах електромагнітного спектра. Комплекти наукової апаратури окремих КСДЗ можуть відрізнятися один від одного.

Принцип сканування. На сучасних супутниках установлюється апаратура, що працює за принципом механічного сканування. Це забезпечує по елементній перегляд підстильної поверхні у досить вузькому тілесному куті. Такий кут називають кутом поля зору приладу. Кут зору приладу утворює конус, перетин якого поверхнею земного еліпсоїда визначає елементарну площу земної поверхні, яка називається роздільною здатністю приладу. Просторова роздільна здатність є найважливішою характеристикою приладу. Іншою не менш важливою характеристикою є смуга огляду (перегляду) земної поверхні. Перегляд смуги підстильної поверхні здійснюється за рахунок переміщення елементарного поля зору в площині, перпендикулярній площині орбіти. Принцип сканування проілюстрований на рис. 1.6.

Комбінація переміщення елементарного майданчика по рядкові сканування з поступальним її переміщенням по поверхні Землі (у результаті руху супутника по орбіті) дозволяє одержати картину двовимірного розподілу інтенсивності відбитої випромєненої та розсіяної радіації в тому або іншому діапазоні спектра електромагнітних хвиль.

Наукова апаратура, що працює у видимому діапазоні електромагнітних хвиль.

Фотографічні засоби. Фотографічні засоби в цей час одержали найбільш широке поширення як вихідні дані для виконання кадастрових і землепорядних робіт. При зйомці зображення земної поверхні будується за законами центральної проекції. Основні види аерофотознімання:

- а) *планова*, коли земна поверхня знімається в напрямку місцевої вертикалі (кут відхилення оптичної осі апарата від вертикалі не перевищує 3°). Така зйомка виконується кадровими апаратами для цілей картографування;
- б) *перспективна* зйомка проводиться з метою одержання додаткової інформації про рельєф земної поверхні та розширення смуги захоплення земної поверхні. У цьому випадку оптична вісь фотокамери може відхилятися від вертикалі на різні кути аж до $60^\circ \dots 70^\circ$;
- в) *панорамна*, коли знімається відразу вся смуга місцевості поперек маршруту польоту „від обрію до обрію”.

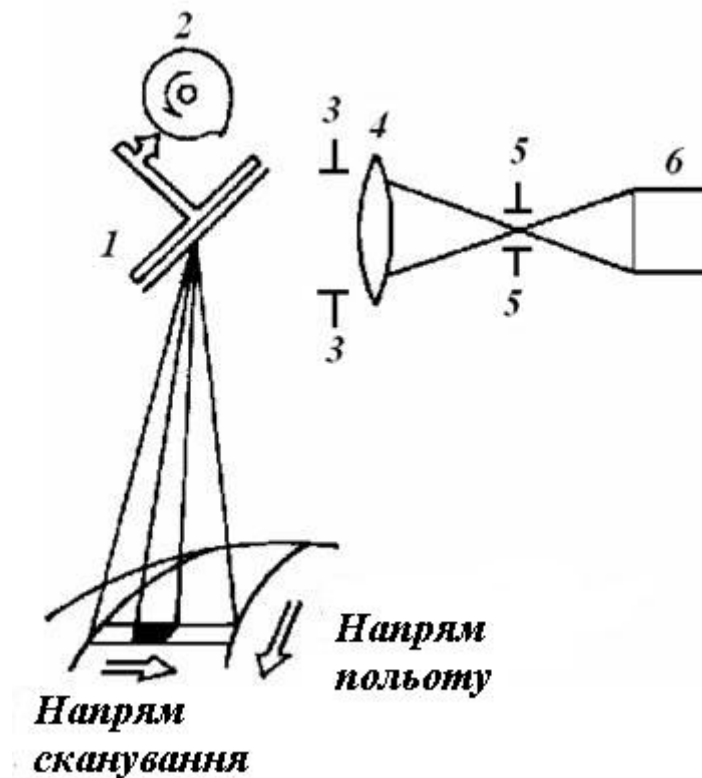


Рис. 1.6 – Принцип сканування

1 – сканувальне дзеркало, 2 – кулачок приводу дзеркала, 3 – діафрагма об'єктива, 4 – об'єктив, 5 – діафрагма приймача, 6 – приймач випромінювання

На практиці, головним чином, використовується перший вид аерофотознімання. Зображення реєструється на фотоплівці (чорно-білій, кольоровій або спектральної). При виконанні спектральної зйомки одночасно виходить кілька зображень тої самої ділянки земної поверхні в декількох зонах спектра. Подальша обробка спектральної знімків дозволяє виконати процедуру дешифрування з урахуванням спектральних властивостей об'єктів, що значно підвищує її ефективність. Сучасні високоякісні фотокамери дозволяють досягти відрізнення на

місцевості в одиниці сантиметрів. Останнім часом усе більш широке поширення одержують технології електронного сканування зображень із аерофотоплівки і подальшої обробки отриманого цифрового зображення на ЕОМ.

Широкого застосування в цей час набувають знімки, виконані за допомогою телевізійних систем, установлених на супутниках. Для одержання зображень у видимій ділянці спектра (0,5...0,7 мкм) на супутниках установлюється апаратура, за допомогою якої може бути виконана зйомка хмарності, крижаних і снігових полів та інших видів підстильної поверхні. Ці об'єкти мають різні коефіцієнти відбиття, що дозволяє одержувати зображення із широким діапазоном півтонів.

Телевізійна система відтворює розподіл яскравості, функціонально пов'язану із загальною потужністю сприйманого променистого потоку в межах області спектральної чутливості перетворювача. На виході первинного телевізійного перетворювача утворюється електричний сигнал, що залежить від потужності променистого вхідного потоку. Сигнал, який називається телевізійним відеосигналом, передається по каналу зв'язку та прийомному обладнанню.

Телевізійні засоби за принципом роботи нагадують фотографічні, тільки замість фотоплівки у фокальній площині об'єктива встановлюється телевізійна передавальна трубка. Формований у ній відеосигнал підсилюється і відтворюється на телевізійному моніторі, установленому на борту носія, або передається по радіоканалу на наземний приймальний пункт і відтворюється вже там, на моніторі оператора. Служить для дистанційного моніторингу земної поверхні в реальному масштабі часу. Телевізійні засоби не можуть забезпечити високе відрінення на місцевості.

При по елементній зйомці прийомне обладнання має малий кут зору. У кожен момент часу телефотометр реагує на середню інтенсивність радіації в межах кута зору оптичної головки. Зображення ж усієї спостережуваної ділянки об'єкта формується шляхом послідовного перегляду її в процесі сканування.

Сканувальні системи. Це великий клас систем ДЗЗ, у якому випромінювання від елементарних ділянок місцевості послідовно фіксується приймачем електромагнітного випромінювання. При цьому поле зору приймача сканує вузьку смужку місцевості в напрямку, перпендикулярному до напрямку польоту носія, тобто виконується його розгортання, подібне до того, що здійснюється в електронно-променевих приладах (формується рядок зображення). За рахунок руху носія рядки зсовуються в напрямку польоту. Синхронно з виконанням процедури сканування здійснюється процес реєстрації випромінювання приймачем. При цьому проводиться розгортання променя запису і формується зображення на екрані відеомонітора або на фотоплівці. За таким же принципом організовано інфрачервоні та лазерні системи ДЗЗ. У лазерних

системах, на відміну від інфрачервоних систем, синхронно зі скануванням місцевості виконується її підсвічування потужним лазером.

У якості приймачів променистої енергії застосовуються прилади, засновані на використанні *явища фотоелектронного ефекту*. Такі прилади придатні для телевізійного спостереження об'єктів в інфрачервоному, видимому, ультрафіолетовому діапазонах хвиль.

Багатоелементні системи ДЗЗ. У цих системах, на відміну від сканувальних, у фокальній площині об'єктива встановлюється лінійка приймачів електромагнітного випромінювання. Таким чином, відпадає необхідність виконання операції сканування. Лінійка приймачів відразу формує один рядок зображення поперек напрямку польоту, а за рахунок руху носія виходить усе зображення як сукупність рядків. Замість лінійки приймачів у фокальній площині об'єктива може встановлюватися матриця приймачів. Найчастіше в якості приймачів використовуються прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). Сучасні ПЗЗ-камери дозволяють одержати зображення, які по роздільній здатності наближаються до фотографічних зображень. Ці системи одержали найбільше поширення при ДЗЗ із космосу.

Наукова апаратура, що працює в інфрачервоному діапазоні електромагнітних хвиль.

В інфрачервоному діапазоні спектра працюють системи, які роблять виміри в певних ділянках спектра або в смугах поглинання окремих газів.

Для виявлення і простежування хмарності на тіньовій стороні Землі (а також на освітленій стороні) широке застосування одержали системи, що працюють у ділянці спектра 8...12 мкм.

Яскравість (тон) зображення якого-небудь об'єкта на ІЧ знімку визначається головним чином температурою випромінюючої поверхні. У цій ділянці спектра теплова радіація, що йде, найбільш близька до власного теплового випромінювання земної поверхні та хмар.

При одержанні космічних зображень у цій області спектра, використовується інфрачервона система, аналогічна системі, що працює у видимому діапазоні і називана *інфрачервоним радіометром*.

Наукова апаратура, що працює в мікрохвильовому діапазоні електромагнітних хвиль.

Наукова апаратура, що робить виміри в мікрохвильовій області спектра, охоплює міліметрову і сантиметрову ділянки радіодіапазону. Мікрохвильові виміри дозволяють одержувати інформацію про хмарність і опади, кількісно визначати зміст водяної пари та води в атмосфері. Дані вимірів можуть бути представлені у вигляді окремих реєстрограм, просторово-часових графіків або в окремих діапазонах, наприклад на довжині 0,8 см, у вигляді напівтонового зображення. Виміри на супутниках проводяться найбільше часто в чотирьох каналах: 0,8; 1,35; 3,4 і 8,5 см.

Радіолокаційні засоби ДЗЗ. На практиці найчастіше використовуються або пасивні радіолокаційні засоби, що реєструють природне електромагнітне випромінювання природних утворень, або активні РЛСБО типу РСА. В активних РЛСБО зондувальні радіоімпульси випромінюються в бічних напрямках відносно польоту носія, і реєструється відбите випромінювання. Спеціальні алгоритми обробки відбитих сигналів дозволяють сформувати дуже вузьку діаграму направленості антени РСА і одержати знімки, що мають відрізнєння на місцевості в кілька метрів, а також одержувати високоточні дані про висоту рельєфу місцевості.

Для одержання зображень одночасно в декількох вузьких ділянках спектра використовується **багатозональна (багатоспектральна, мультиспектральна або гіперспектральна) апаратура**.

Гіперспектральні дані, отримані оглядовими спектрометрами, являють собою практично безперервний спектр для кожного елемента зображення (пікселя). Схематично це можна представити у вигляді спектрального куба (рис. 1.7).

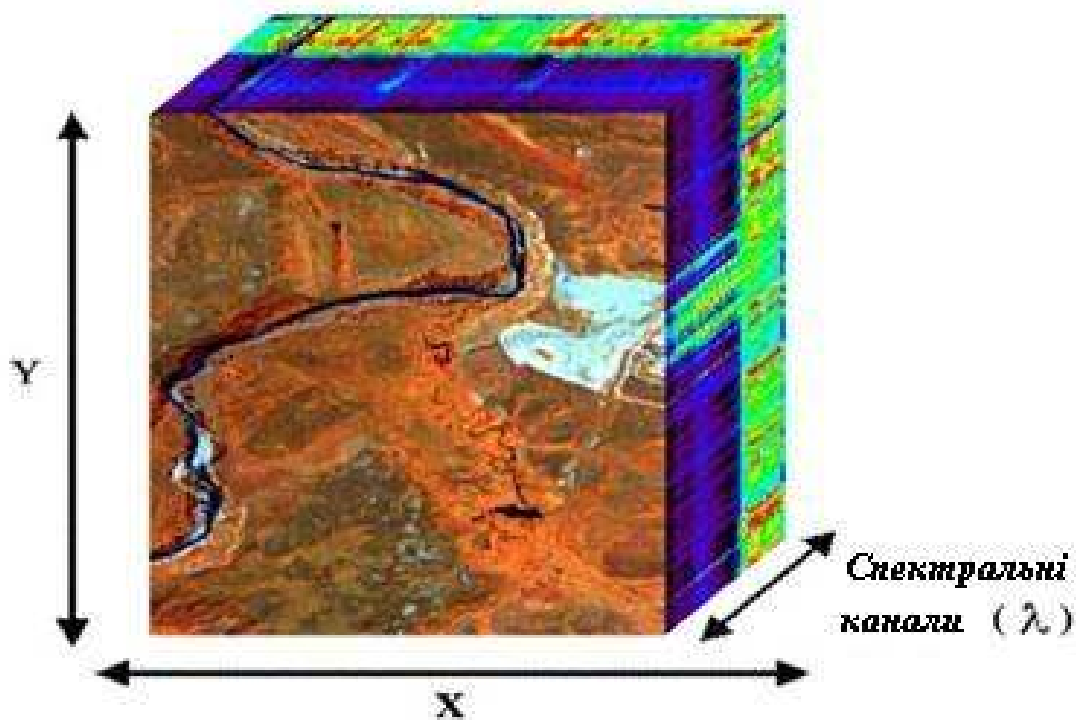


Рис. 1.7 – Спектральний куб
(X, Y – просторові координати; λ – число спектральних каналів, кожний з яких має власне спектральне значення)

Звичайно працюючі спектральні ділянки зйомки розташовуються в межах видимої та інфрачервоної близької області спектра (0,5...0,6;

0,6...0,7; 0,7...0,8; 0,8...1,1 мкм).

Види зйомки. Залежно від завдань зйомка може виконуватися по різних методиках (рис. 1.8, 1.9, 1.10, 1.11).

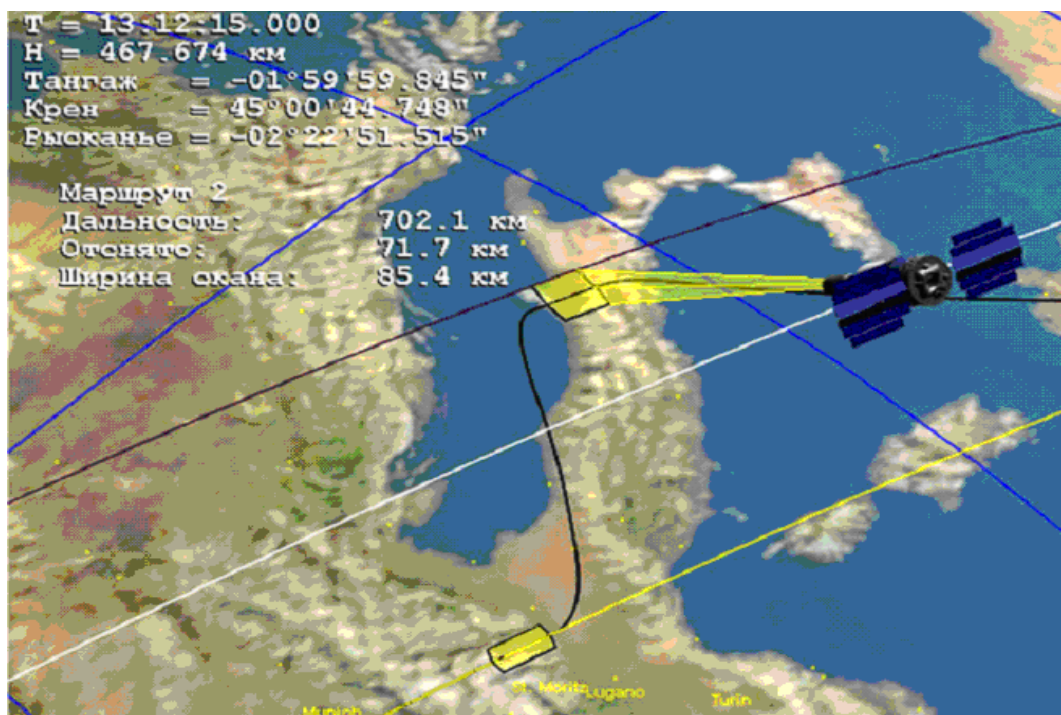


Рис. 1.8 – Об'єктова зйомка

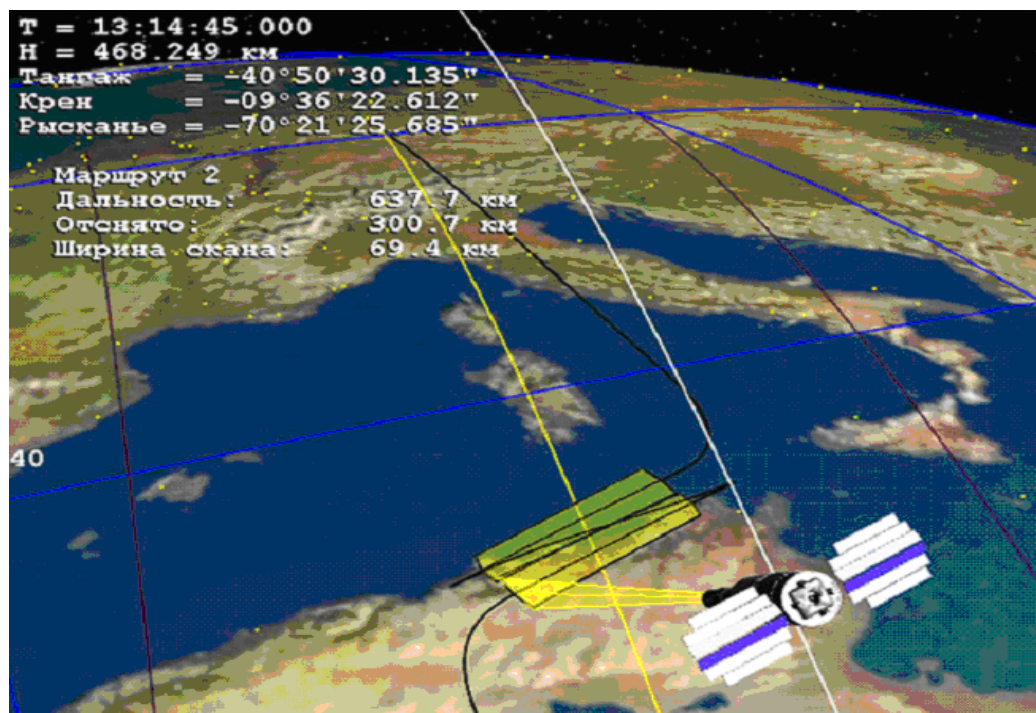


Рис. 1.9 – Зйомка майданчика

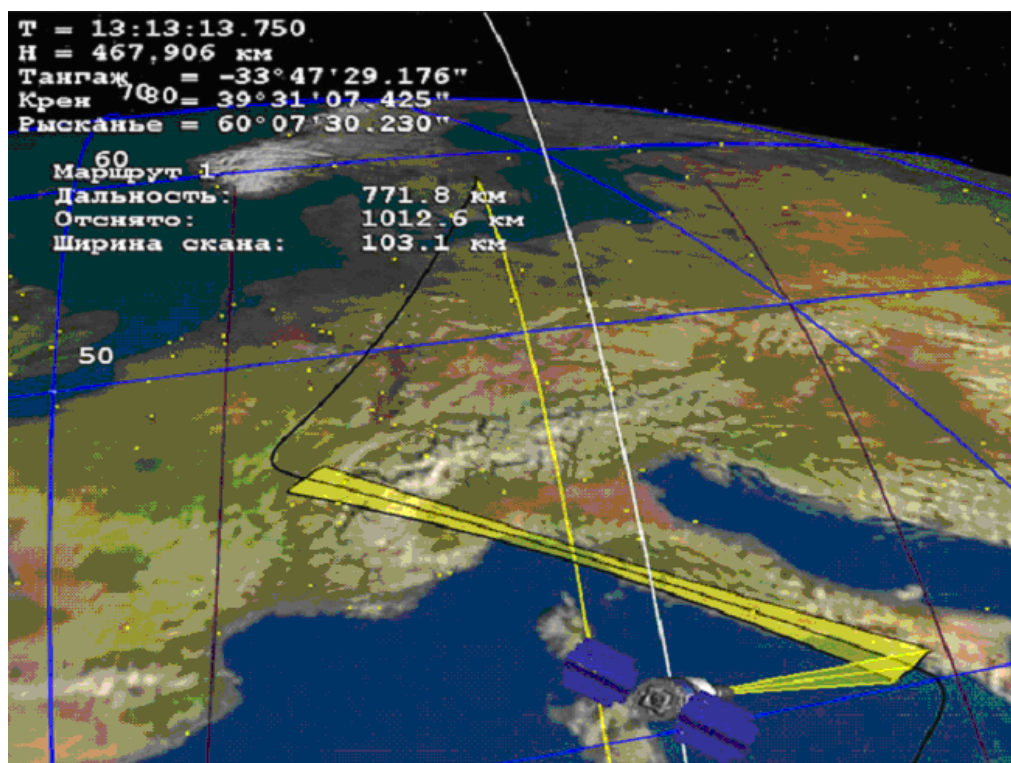


Рис. 1.10 – Маршрутна зйомка

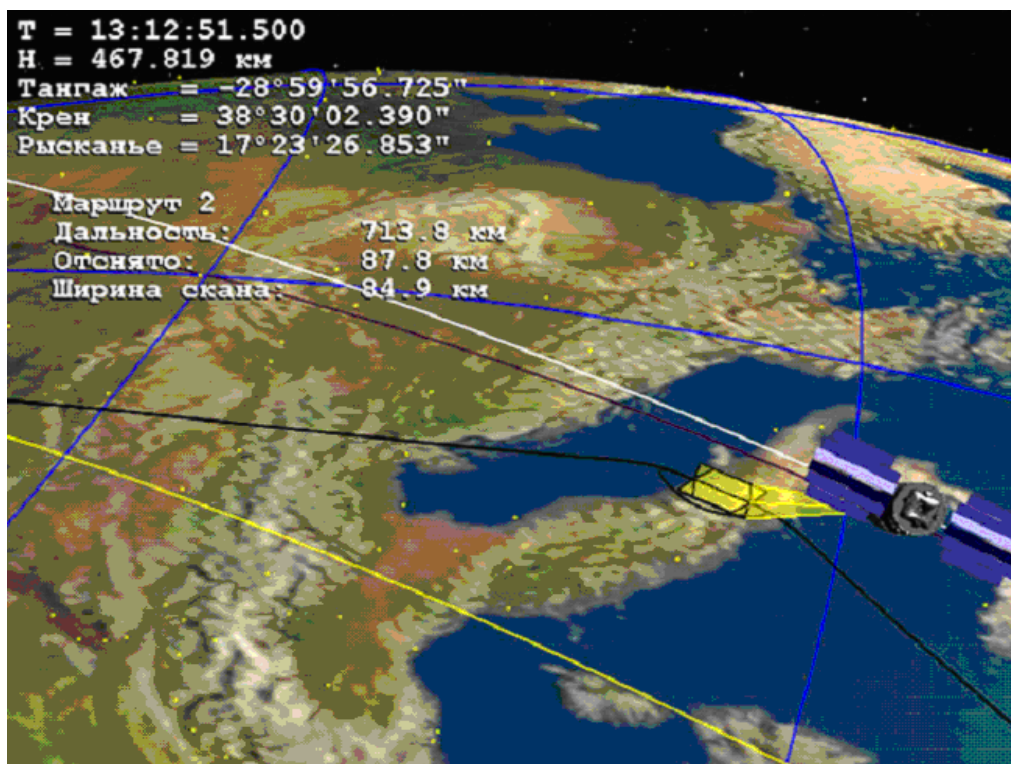


Рис. 1.11 – Маршрутна стереоскопічна зйомка

1.5 Космічні системи дистанційного зондування Землі

Характеристика наукової апаратури космічного апарата „Ресурс – П”. Супутник призначений для дистанційного зондування Землі та передачі одержаних даних по радіоканалу на наземний комплекс планування цільового застосування, приймання, обробки і поширення даних ДЗЗ в інтересах оцінки природних ресурсів, виявлення надзвичайних ситуацій, сільського господарства, рибальства, гідрометеорології, служби реєстрації, кадастру та картографії (рис. 1.12, 1.13; табл. 1.1, 1.2).

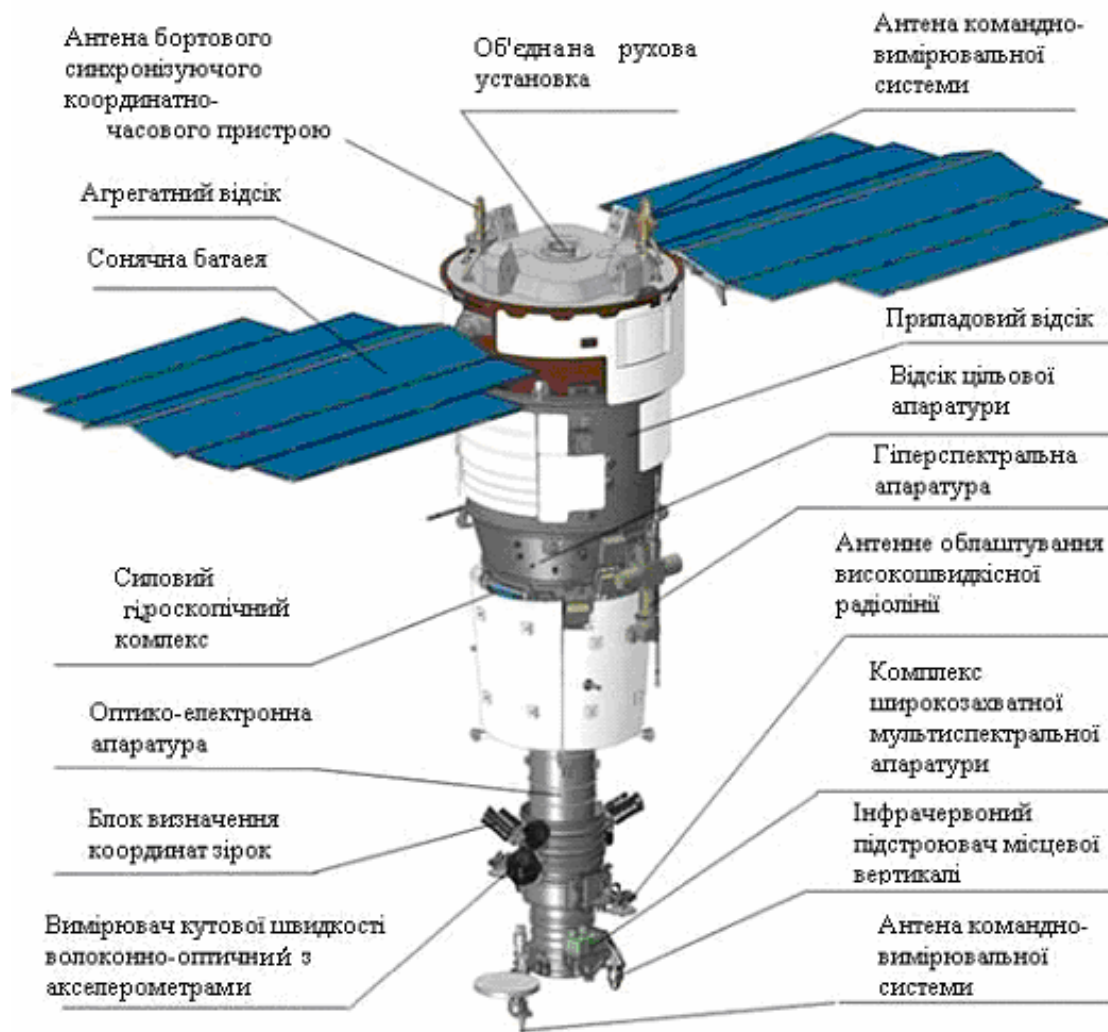


Рис. 1.12 – Зовнішній вигляд космічного апарата „Ресурс–П”

Гіперспектральна апаратура (рис. 1.14,а; табл. 1.3) забезпечує зйомку поверхні Землі і одержання інформації про розподіл поля спектральної енергетичної яскравості.

Комплекс широкозахватної мультиспектральної апаратури (рис.

1.14,б; табл. 1.4) забезпечує дистанційну зйомку земної та водної поверхні в панхроматичному і мультиспектральному діапазонах. Складається із систем високого і середнього відрізнєння ШМСА-ВР і ШМСА-СР, які можуть працювати як одночасно, так і роздільно.

Таблиця 1.1 – Характеристики космічного апарата „Ресурс–П”

Високодетальне спостереження (відрізнєння)	
Відрізнєння на місцевості з Н = 475 км, м	
– у панхроматичному діапазоні	краще 1
– у вузьких спектральних діапазонах	3,0...4,0
Ширина смуги захоплення з Н = 475 км,	38
Спектральні діапазони, мкм	
– панхроматичний	0,58...0,80;
– вузькі спектральні діапазони	0,45...0,52; 0,52,0,60; 0,61...0,68; 0,72...0,80; 0,80...0,90.
Кількість спектральних діапазонів	6
Середньоквадратична помилка (СКП) координатної прив'язки знімків без опорних точок, м	не гірше 10...15
Середня продуктивність у високодетальному режимі зйомки в панхроматичному діапазоні в добу, млн. км ² .	0,080
Гіперспектральне спостереження	
Кількість спектральних інтервалів	не менше 96
Відрізнєння на місцевості з Н = 475 км, м	25...30
Детальне широкозахватне спостереження	
Відрізнєння на місцевості з Н = 475 км, м	
– у пан хроматичному діапазоні	12; 60
– у мультиспектральних діапазонах	23,8; 120
Смуга захоплення, км	97; 441
Періодичність спостереження, доба	3
Оперативність передачі інформації на пункт приймання, година	від реального масштабу часу до 12
Параметри робочої орбіти	
– тип орбіти	кругова, сонячно-синхронна
– середня висота, км	від 470 до 480
– нахилєння, градусів	97,28
Строк активного існування, років	5

Таблиця 1.2 – Характеристики оптико-електронного комплексу „Геотон-Л1” космічного апарата „Ресурс-П”

Фокусна відстань, мм	4000
Діаметр входної зіниці, мм	500
Відносний отвір	1 : 8
Кут поля зору	5°12'
Кількість оптико-електронних перетворювачів	3



Рис. 1.13 – Зовнішній вигляд оптико-електронного комплексу „Геотон-Л1” космічного апарата „Ресурс-П”

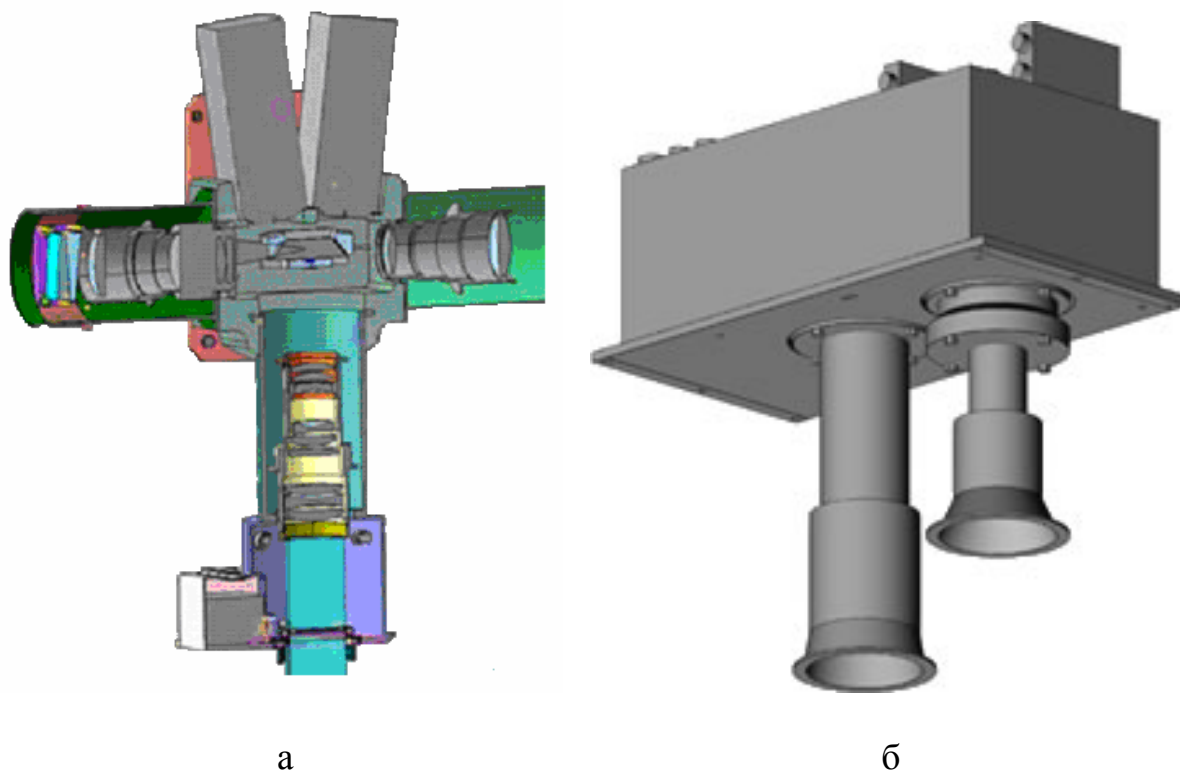


Рис. 1.14 – Зовнішній вигляд гіперспектральної апаратури (а) і широкозахватної мультиспектральної апаратури (б) космічного апарата „Ресурс–П”

Таблиця 1.3 – Характеристики гіперспектральної апаратури космічного апарата „Ресурс–П”

Кількість спектральних каналів	до 216
Спектральне відрізнєння, нм	від 5 до 10
Смуга захоплення (у надирі), км	30
Просторове відрізнєння у надирі, м	30
Відношення сигнал/шум при значенні сигналу, близькому до сигналу насичення	не менше 200
Розрядність представлення інформації, біт/піксель	14

Таблиця 1.4 – Характеристики комплексу широкозахватної мультиспектральної апаратури космічного апарата „Ресурс–П”

Характеристика	ШМСА-ВР		ШМСА-СР	
	панхром. канал	мультиспектр. канал	панхром. канал	мультиспектр. канал
Смуга захоплення, км	97,2		441,6	
Роздільна здатність комплексу (проекція пікселя), м	11,9	23,8	59,4	118,8
Спектральні діапазони, мкм	0,43...0,70	0,43...0,51 0,51...0,58 0,60...0,70 0,70...0,90 0,80...0,90	0,43...0,70	0,43...0,51 0,51...0,58 0,60...0,70 0,70...0,90 0,80...0,90
Фокусна відстань об'єктива, мм	200		40	
Розмір фоточутливого елемента ОЕП, мкм ²	5×5	10×10	5×5	10×10
Кількість фоточутливих елементів у рядку ОЕП	8160	4080×4	8160	4080×4
Розрядність лінійного кодування інформації, біт/піксель	12			

Дані ДЗЗ, одержувані космічним комплексом „Ресурс–П” використовуються для розв'язання наступних задач:

- інвентаризація та моніторинг природних ресурсів (сільськогосподарських і лісових угідь, пасовищ, районів промислу морепродуктів, створення земельного кадастру) і контроль господарських процесів для забезпечення раціональної діяльності в сільській, лісовий, рибної, водної та інших галузях господарства;
- моніторинг районів надзвичайних ситуацій з метою попередження розвитку стихійних лих, аварій, катастроф, а також оцінка їх наслідків з метою планування відбудовних заходів;
- одержання даних для складання та відновлення загально географічних, тематичних і топографічних карт різного масштабу;
- контроль забруднення і деградації навколишнього середовища, у

тому числі екологічний контроль у районах геологорозвідувальних робіт і видобутку корисних копалин, виявлення та вивчення забруднень навколишнього середовища;

- контроль водоохоронних і заповідних районів;
- інформаційне забезпечення для пошуку нафти, природного газу, рудних і інших родовищ корисних копалин;
- контроль забудови територій, одержання даних для інженерної оцінки місцевості в інтересах господарської діяльності;
- інформаційне забезпечення для прокладки магістралей і великих споруджень, автомобільних, залізниць, нафто– і газопроводів, систем зв'язку;
- виявлення незаконних посівів наркомістких рослин і контроль їх знищення;
- оцінка льодової обстановки.

Характеристика наукової апаратури космічного апарата „Landsat 7”, (рис. 1.15; табл. 1.5). Від супутників *Landsat 4* і *Landsat 5* його відрізняють:

- 1) панхроматичний канал із просторовим відрізненням 15 метрів;
- 2) 5% абсолютне радіометричне калібрування;
- 3) тепловий інфрачервоний канал із просторовим відрізненням 60 метрів.

Таблиця 1.5 – Характеристики наукової апаратури космічного апарата „Landsat 7”

Спектральні канали	Спектральний діапазон, мкм	Просторове відрізнення, м	Ширина смуги огляду, км
1	0,45...0,515	30	185
2	0,525...0,605	30	
3	0,63...0,690	30	
4	0,75...0,90	30	
5	1,55...1,75	30	
6	10,40...12,5	60	
7	2,09...2,35	30	
Панхроматичний	0,52...0,90	15	

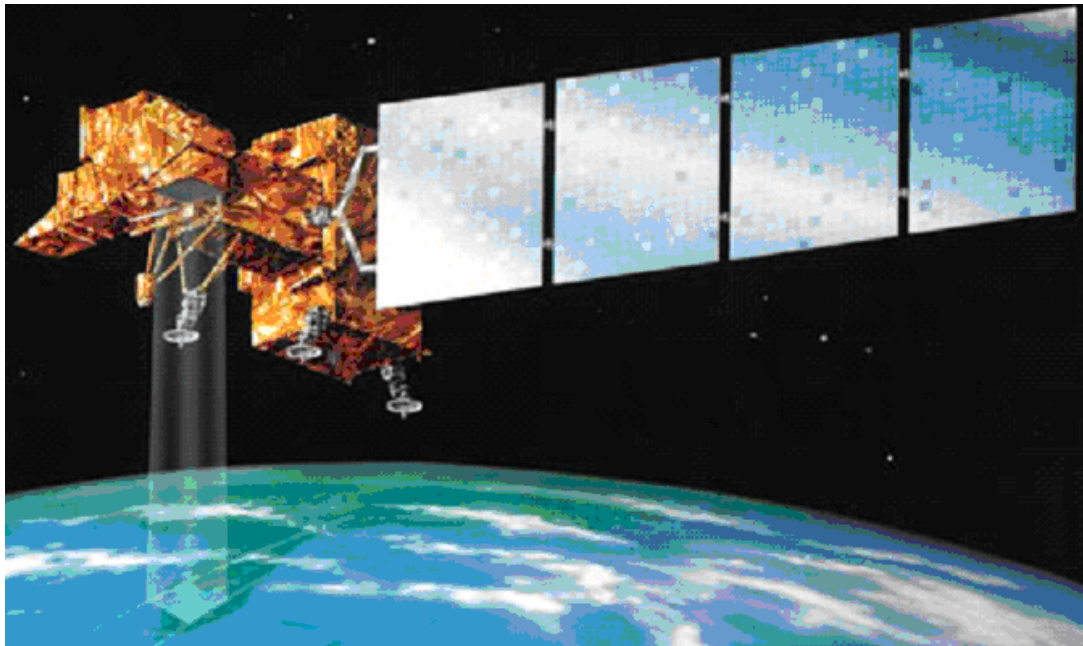


Рис. 1.15 – Зовнішній вигляд космічного апарата „Landsat 7”

Характеристика наукової апаратури космічного апарата TerraSAR-X. Розроблений під керівництвом і за участю Німецького аерокосмічного центру (табл. 1.6). Супутник виведений на кругову сонячно-синхронну орбіту висотою 514 км із нахиленням $97,44^\circ$.

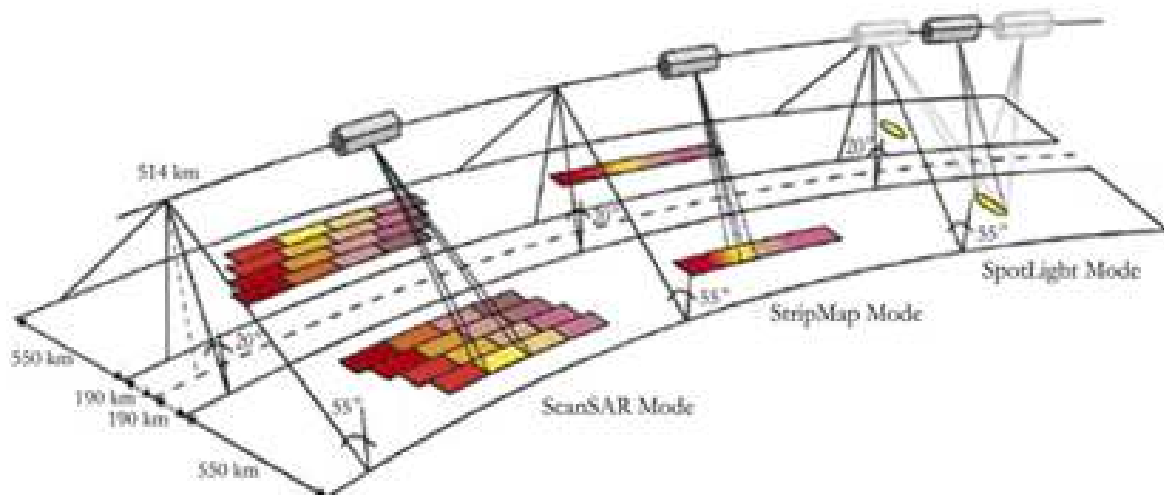


Рис. 1.16 – Методика зйомки супутником TerraSAR-X

Оснащений радаром із синтезованою апертурою (РСА) (рис. 1.16), що дозволяє виконувати радіолокаційну зйомку земної поверхні із

просторовим відрізненням до 1 м. Радар виконує зйомку земної поверхні в Х-діапазоні, довжина хвилі 3,1 см зі змінюваною поляризацією випромінювання (HH, VH, HV, VV). Діапазон знімальних кутів від 20° до 55°.

Таблиця 1.6 – Характеристики наукової апаратури космічного апарата „TerraSAR-X”

Характеристики	Основні режими			
	Надвисокого відрізнення (High Resolution Spotlight)	Високого відрізнення (Spotlight)	Широкосмуговий високого відрізнення (Stripmap)	Середнього відрізнення (Scansar)
Номінальний просторове відрізнення	1 м	2 м	3 м	16 м
Розмір сцени	10км × 5км	10км × 10км	30км × 50км	100км × 150км
Швидкість передачі даних на наземний сегмент	300 Мб/сек			
Радіометричне відрізнення	16 біт на піксель			
Формат файлів	CEOS, Geotiff			
Обробка	Радіометрична, сенсорна та геометрична корекція. Приведення до картографічної проекції, створення ЦМР, похідних картографічних продуктів			
Періодичність зйомки	11 діб, підцикл: 2,5 доби			
Строк виконання замовлення	1...3 дні для архівних даних 1...6 днів для зйомки на замовлення			
Мінімальна площа замовлення	Одна стандартна сцена для кожного з режимів			

Області застосування даних дистанційного зондування, отриманих із супутника TerraSAR-X:

- створення і відновлення топографічних і спеціальних карт до масштабу 1:10 000;
- створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) і цифрових моделей місцевості (ЦММ) високої точності (2...4 м по висоті);

- високоточне спостереження за станом об'єктів транспортної інфраструктури (трубопроводи, залізниці і т.д.), а також різних будов, інженерних споруджень і т.д.,
- оцінка сейсмічної небезпеки, прогнозування землетрусів, вивержень вулканів,
- все погодні моніторинг наслідків природних і антропогенних катастроф (водопілля, землетрусу, цунамі, техногенних аварій і т.д.),
- контроль берегових зон і спостереження за суднами,
- картування сільськогосподарських культур, визначення стану посівів, високоточне сільське господарство,
- картування деревостоїв, визначення породного складу лісів без наземних досліджень, моніторинг вирубок і стану лісів,
- контроль і керування міським середовищем,
- забезпечення оборони й безпеки.

Характеристика наукової апаратури космічного апарата „NOAA”.

Дані метеорологічної системи на базі полярно-орбітальних космічних апаратів серії NOAA (Національне управління по дослідженню океану і атмосфери США) використовуються при розв'язанні задач, пов'язаних із прогнозуванням погоди, з моніторингом хмарного покриву Землі та інших погодних явищ у видимому і інфрачервоному діапазонах спектра, з виміром вертикального профілю температури атмосфери, з визначенням характеристик приповерхневого вітру, з визначенням температури поверхні моря і суші, зі збором інформації із платформ геофізичного моніторингу навколишнього середовища, з вивченням навколосезонного космічного простору, з вивченням озонового шару і змісту аерозолів в атмосфері, з моніторингом стану навколишнього середовища, зі зйомкою сніжного й льодового покривів Землі, з одержанням інформації дистанційного зондування в інтересах сільського та лісового господарства, з виявленням лісових пожеж, з розрахунками вегетаційних індексів, із прогнозом пожежонебезпеки лісів, кліматології, океанографії.

На рис.1.17 зображено супутник „NOAA”.

Супутники NOAA мають довжину 4,18 м, діаметр 1,88 м, масу на орбіті 1030 кг. Кругова орбіта має висоту 870 км, один виток супутник робить за 102 хв. Площа сонячних батарей супутника 11,6 м², потужність батарей не менше 1,6 кВт, але згодом батареї деградують через вплив космічних променів і мікрометеорів. Для нормальної роботи супутника необхідна потужність не менш 515 Вт.

У цей час на орбіті функціонують кілька супутників цієї серії. Сканер AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer – удосконалений радіометр із дуже високою роздільною здатністю) установлюється тільки на супутниках NOAA (рис. 1.18). Він призначений для сканування

навколишнього простору дзеркалом з берилію, що обертаються зі швидкістю 360 обертів у хвилину (6 об/с) перпендикулярно до напрямку польоту супутника (циліндричне сканування). Має 8-дюймову (20 см) оптичну систему Кассегрена. Кут сканування $\pm 55^\circ$, смуга огляду близько 3000 км. Через кривизну Землі зона радіовидимості супутника становить ± 3400 км, тому за один прохід супутника вдається одержати інформацію з поверхні близько 3000×7000 км.

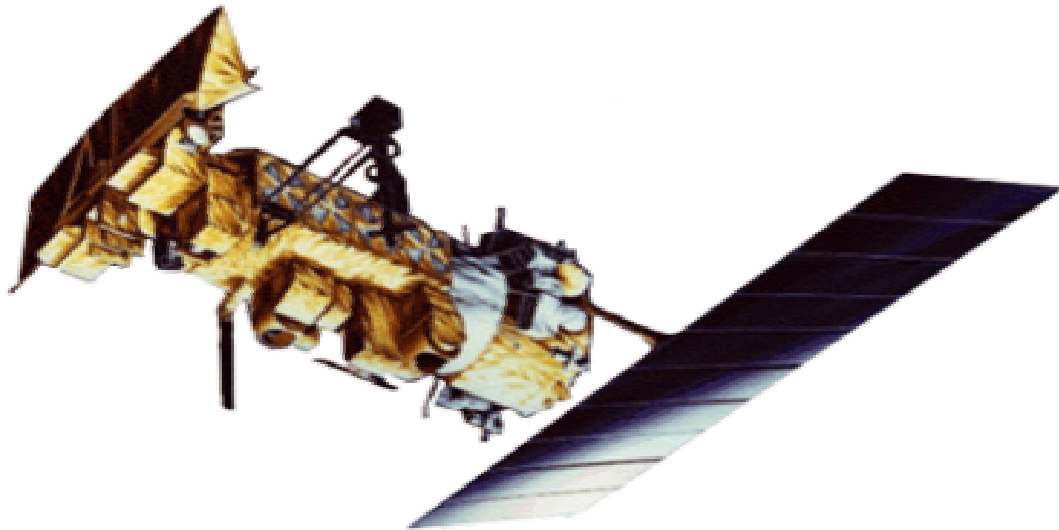


Рис. 1.17 – Космічний апарат „NOAA”

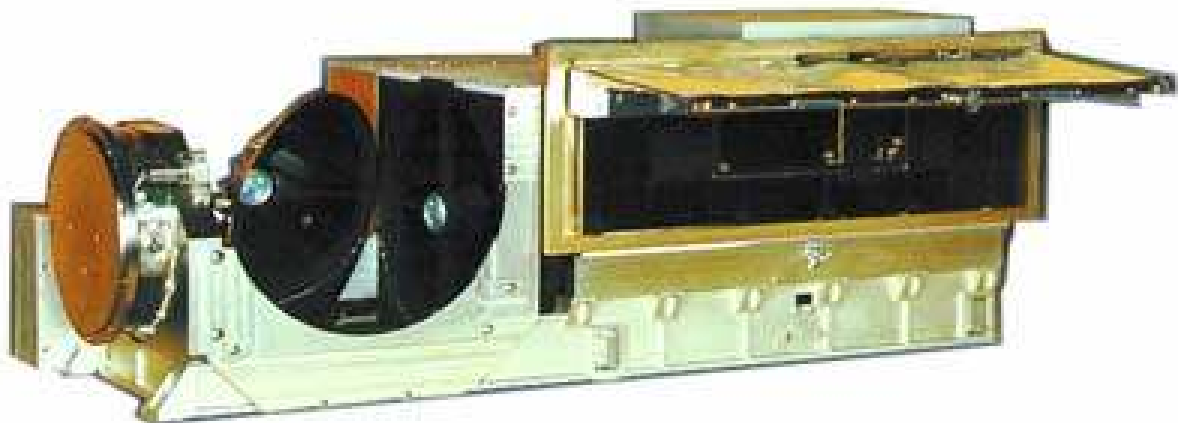


Рис. 1.18 – Радіометр AVHRR

З кожним обертотом дзеркала радіометр послідовно обдивляється глибокий космос, земну поверхню і нагрітий радіатор абсолютно чорного тіла, який є частиною приладового кожуха.

Промениста енергія, зібрана дзеркалом, проходить через телескоп і

розділяється на п'ять (або шість) оптичних каналів відповідних спектральним „вікнам”. Датчик кожного оптичного каналу чутливий до променистої енергії в межах відповідної спектральної області: видимої, близької інфрачервоної, середньої інфрачервоної, термальної інфрачервоної.

Крім того, на супутниках цієї серії встановлюється апаратура збору даних з наземних метеорологічних платформ, а також устаткування приймання сигналів небезпеки в рамках системи „КОСПАС”/SARSAT.

На космічному апараті NOAA установлений радіометр AVHRR – прилад для виміру параметрів випромінювання (одержання цифрового зображення) з поверхні Землі та інформації про нижні шари атмосфери. Даний прилад фіксує відбитий сигнал у п'ятьох спектральних діапазонах, що включають:

- Канал 1 – видимий (0,53 мкм...0,73 мкм);
- Канал 2 – близький інфрачервоний (0,73 мкм...1,1 мкм);
- Канал 3 – середній інфрачервоний (3,5 мкм...3,9 мкм);
- Канал 4 – термальний інфрачервоний (10,3 мкм...11,3 мкм);
- Канал 5 – термальний інфрачервоний (11,5 мкм...12,5 мкм).

На супутниках, починаючи з NOAA–15, установлений 6-й додатковий канал, що працює на хвилі довжиною близько 1,6 мкм для розпізнавання снігу й льоду.

Канал 1 радіометра AVHRR фіксує відбитий сигнал у видимій частині спектрального діапазону. Одержуване цифрове зображення можна використовувати для:

- спостереження за різними типами земної поверхні;
- аналізу альbedo хмарного покриву і поверхні Землі;
- детектування димів і туманів;
- визначення відмінностей між сніговими і водонасиченими хмарами (снігові хмари, як правило, погані відбивачі у видимому діапазоні, а водонасичені хмари, як правило, гарні відбивачі видимого світла).

Канал 2 радіометра AVHRR фіксує відбитий сигнал у близькій інфрачервоній частині спектрального діапазону. Одержуване цифрове зображення можна використовувати для:

- спостереження за водною оболонкою Землі (вода, як правило, має більш низький відбитий сигнал, чим у межах діапазону 1-го каналу);
- визначення відношення каналу 2 і каналу 1 для розрахунків вегетаційного індексу;
- спостереження земної поверхні через атмосферний серпанок (останній пропускає близьке інфрачервоне випромінювання);
- визначення відмінностей між сніговими й водонасиченими

хмарами.

Канал 3 радіометра AVHRR фіксує відбитий сигнал у тій частині спектрального діапазону, яка фіксує випромінювання в нічний час, і близьке по внескові до вихідної і відбитої сонячної радіації у денний час. Одержуване цифрове зображення можна використовувати для обробки інформації, отриманої в нічний час, для:

- визначення типів хмарності (для визначення типів хмарності завжди використовуються канали 4 і 5);
- використання відмінностей між каналами 3 і 4 для визначення структури розподілу температур усередині хмарності;
- детектування пожеж і вулканічних вивержень.

Канал 4 радіометра AVHRR фіксує відбитий сигнал у тій частині спектрального діапазону, у якій теплове випромінювання Землі домінує увесь час (включаючи день і ніч). Одержуване цифрове зображення можна використовувати для обробки інформації, одержуваної в будь-який час доби для:

- оцінки температурної „яскравості” земної і водної поверхні, а також верхніх шарів хмарного покриву;
- детектування типів хмарності (завжди в порівнянні з інформацією з інших каналів);
- використання відмінностей між каналами 3 і 4 для визначення структури температурного розподілу усередині хмарності (у нічний час);
- порівняння з каналом 5 для визначення нижнього рівня вологості;
- порівняння з каналом 5 для детектування розподілу викидів вулканічного попелу.

Канал 5 радіометра AVHRR фіксує відбитий сигнал у тій частині спектрального діапазону, у якій теплове випромінювання Землі домінує увесь час (включаючи день і ніч). Одержуване цифрове зображення можна використовувати для обробки інформації, одержуваної в будь-який час доби для:

- оцінки температурної „яскравості” земної і водної поверхні, а також верхніх шарів хмарного покриву;
- детектування типів хмарності (завжди в порівнянні з інформацією з інших каналів).

Контрольні запитання

- 1 Які існують ділянки траєкторії польоту штучних супутників Землі (ШСЗ) ?
- 2 Що таке збурений рух ШСЗ ?

- 3 Які існують елементи орбіти ШСЗ ?
- 4 Які існують типи орбіт ШСЗ ?
- 5 Які пред'являються вимоги до орбіт супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) ?
- 6 Охарактеризуйте процес ДЗЗ
- 7 Охарактеризуйте пасивні методи ДЗЗ
- 8 Охарактеризуйте активні методи ДЗЗ
- 9 Що є джерелом інформації при ДЗЗ ?
- 10 Які діапазони електромагнітних хвиль (ЕМХ) використовуються для ДЗЗ ?
- 11 Охарактеризуйте світловий діапазон ЕМХ із погляду ДЗЗ
- 12 Охарактеризуйте середній і далекий інфрачервоний (ІЧ) діапазон ЕМХ із погляду ДЗЗ
- 13 Охарактеризуйте радіодіапазон ЕМХ із погляду ДЗЗ
- 14 Що являє собою космічна система дистанційного зондування ?
- 15 Для чого призначений комплекс службової апаратури КСДЗ ?
- 16 Для чого призначений комплекс наукової апаратури КСДЗ ?
- 17 У чому полягає принцип сканування ?
- 18 Охарактеризуйте апаратуру працюючу у видимому діапазоні ЕМХ
- 19 Охарактеризуйте апаратуру працюючу в інфрачервоному діапазоні ЕМХ
- 20 Охарактеризуйте апаратуру працюючу в мікрохвильовому діапазоні ЕМХ
- 21 Що таке мультиспектральна апаратура ?
- 22 Які види зйомки використовуються при ДЗЗ ?
- 23 Охарактеризуйте апаратуру космічного апарата „Ресурс-П”
- 24 Охарактеризуйте апаратуру космічного апарата „Landsat 7”
- 25 Охарактеризуйте апаратуру космічного апарата „TerraSAR-X”
- 26 Охарактеризуйте апаратуру космічного апарата „NOAA”
- 27 Охарактеризуйте радіометр „AVHRR”

2 ХАРАКТЕРИСТИКА АЕРОКОСМІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

2.1 Основні види аерокосмічної інформації і вимоги, що ставляться до неї

Основними видами аерокосмічної інформації (АКІ), яка надходить із супутників, є аерокосмічні зображення Землі та дані радіаційних, спектрометричних і мікрохвильових вимірів.

Основні вимоги до АКІ. У поточний час в основу прогнозів розвитку

процесів і явищ покладений великий обсяг інформації, одержуваної за допомогою численних методів спостережень і вимірів, у тому числі одержуваної на різних висотах над Землею. Особливе місце в сукупності інформації, що надходить для аналізу в центри обробки, займає наукова інформація, передана із супутників. Знімки, одержані в різних областях спектра електромагнітних хвиль, і радіаційні карти суттєво доповнюють відомості про важкодоступні райони. Внесок космічної інформації стає істотним при аналізі синоптичного положення, стану екосистем, особливо при спільному використанні даних наземних і аерологічних спостережень, отриманих у єдиний момент часу для великого географічного району.

Комплексний аналіз усієї АКІ обумовлений певними вимогами до неї, що забезпечують можливість подальшого використання:

- глобальність,
- тривимірність,
- комплексність,
- синхронність,
- регулярність,
- оперативність,
- відрізненні даних на місцевості,
- смуга захоплення (огляду) наукової апаратури,
- точність, з якою може бути визначений відповідний елемент.

Усі вимоги до даних повинні виконуватися в сукупності, тому що порушення хоча б одного з них значно знецінює всю інформацію, що надійшла.

Вимогу *глобальності* наукової АКІ може бути задоволено декількома шляхами:

- 1) збором даних за допомогою системи геостаціонарних супутників;
- 2) спостереженням і збором даних космічною системою;
- 3) використанням запам'ятовувальних пристроїв, наявних на борті супутника, і скиданням інформації на пункті приймання інформації (ППІ), тобто роботою наукової апаратури в режимі запам'ятовування інформації (ЗІ).

Просторове представлення про розподіл даних дуже важливо при метеорологічному аналізі. Питання *тривимірності* вимірів не повністю задовольняють сучасні вимоги. Якщо по площі виміру із супутників є певні успіхи, то розв'язання задачі відновлення вертикальних профілів різних величин вимагає вдосконалювання методик відновлення цих даних.

Комплексність супутникових вимірів забезпечується установкою на борті супутників різних видів наукової апаратури, а також використанням сукупності засобів спостережень і збору даних сучасними авіаційними, наземними і космічними системами.

Знімання інформації в єдиний фізичний момент часу – одне з

найважливіших вимог до АКІ, тому *синхронність* знімання інформації забезпечується в першу чергу вибором орбіт оперативних супутників ДЗЗ. Велике значення для задоволення цієї вимоги має визначення кута нахилу орбіти супутника, зокрема, використання сонячно-синхронної орбіти. Використання в складі космічних систем декількох супутників, що передають інформацію в режимі безпосередньої передачі, спрощує розв'язання питання синхронності спостережень у строки, прийняті на мережі. Дослідження показують, що невеликі відхилення в часі, пов'язані з використанням даних навіть тільки з одного супутника Землі, виявляються порівнянними згодом старіння даних наземних спостережень.

Регулярність спостережень із супутника забезпечується бортовою системою керування роботою наукової апаратури. Вона визначається заданою програмою вимірів і контролюється різними наземними приладами. Режим роботи супутникової апаратури повністю забезпечують цю вимогу.

Оперативність одержання АКІ пов'язана з особливостями вимірів і поширення супутникових даних. Враховуючи широке використання бортових і наземних електронно-обчислювальних комплексів для початкової обробки космічних даних, можна розраховувати на певні перспективи підвищення оперативності доведення наукової інформації до споживача.

Вимоги до *відрізнення* АКІ визначаються завданнями, які ставляться перед аналізом знімка або даних радіаційних вимірів. В окремих випадках для прогнозу досить мати оглядові зображення з малим відрізненням, а в деяких випадках пропонованим вимогам будуть відповідати тільки детальні знімки з більшим відрізненням.

Вимоги до *смуги огляду* супутникової апаратури визначаються вибором оптимальної висоти орбіти, її типом і технічними характеристиками знімальної апаратури супутника. У цілому сучасна апаратура супутника забезпечує виконання цієї вимоги.

Точність вимірів величин у значній мірі залежить від технічних можливостей бортової апаратури, від досконалості методів розрахунків цих величин по методиках рішення зворотних задач. Ця вимога тісно пов'язана із практичним вирішенням питання про тривимірність вимірів. Для більшості величин досягнуті точності виміру та роздільна здатність не завжди відповідають основним вимогам. Розв'язання даної проблеми в першу чергу пов'язане з удосконаленням апаратури, а також з подальшим розвитком космічних систем.

2.2 Космічні знімки

Космічна зйомка Землі охоплює широкий спектр її електромагнітного випромінювання. Знімки, отримані в різних діапазонах хвиль (видимому,

інфрачервоному та мікрохвильовому), є одним з основних видів наукової інформації про стан підстильної поверхні, про атмосферу Землі і її об'єкти.

Масштаб зображення знімка залежить від ряду характеристик, зокрема, від параметрів орбіти, висоти польоту супутника, кута сканування, виду траєкторії носія, закону зміни швидкості переміщення візирного променя по рядкові та кутових елементів орієнтування сканувального обладнання.

Масштаб космічного знімка по рядкові сканування внаслідок кривизни Землі непостійний. Так, наприклад, на знімку, отриманому у видимому діапазоні із супутника „Метеор” ($H = 900$ км), він змінюється від $1:10345000$ у районі підсупутникової точки до $1:11427000$ на краю знімка. Масштаб знімка в поздовжньому напрямку, на відміну від масштабу по рядкові сканування, порівняно постійний.

Розглянуті залежності характерні тільки для неспотвореного знімка. При космічній зйомці із супутника завжди мають місце викривлення. Вони обумовлені недосконалістю оптичної і електронної частин приймально-передавального тракту та випадковими змінами елементів зовнішнього орієнтування.

Зображення, отримані у видимій ділянці спектра. Вони є одним з найважливіших видів інформації. Зйомка здійснюється оптико-механічною сканувальною апаратурою над освітленою територією Землі і має підвищену інформативність (рис. 2.1). Для збору та поширення використовуються дві схеми: централізована й автономна.

У режимі безпосередньої передачі сканувальний телефотометр, установлений на супутнику „Метеор”, забезпечує одержання знімка із захопленням на місцевості 2100 км і відрізненням 2 км у надирі. Масштаби зображень по рядкові $1:11 \cdot 10^6$, по кадру $1:12 \cdot 10^6$.

Знімки, отримані за допомогою п'ятиканального сканувального радіометра високого відрізнення, установленного на супутнику NOAA, мають захоплення на місцевості 3000 км і відрізнення 4 км по всьому полю знімка. Масштаби зображень по рядкові $1:30 \cdot 10^6$, по кадру $1:25 \cdot 10^6$.

Зображення, отримані з геостаціонарних супутників серії ГОЕС у режимі безпосередньої передачі, мають відрізнення на місцевості близько 9×9 км. Знімок з одного супутника забезпечує зображення 30% площі Землі.

Характеристики знімків, отриманих із супутників у режимі запам'ятовування, трохи відмінні від знімків у режимі безпосередньої передачі. Так, знімки, виконані із супутника „Метеор-2”, мають смугу огляду на місцевості 2400 км і відрізнення 1 км у надирі. Особливістю цих знімків є наявність на них координатної сітки.

Знімки супутників NOAA, що надходять у централізованому режимі збору інформації, мають більшу роздільну здатність, ніж знімки, отримані в режимі безпосередньої передачі. Відрізнення на місцевості при плановій

зйомці із супутників серії NOAA рівно $1,1 \times 1,1$ км, загальна ширина смуги захоплення на місцевості в цьому випадку рівна 3300 км.

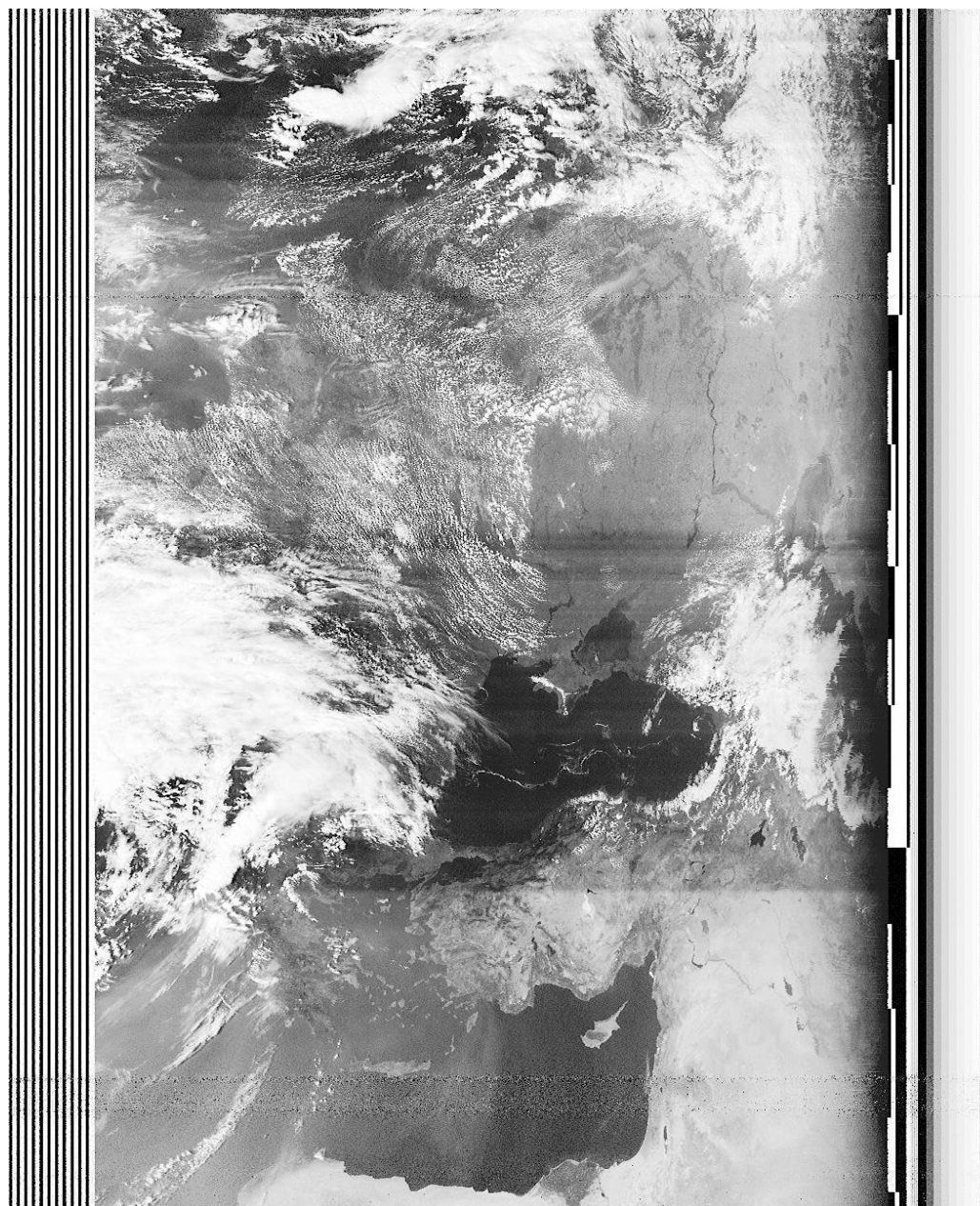


Рис. 2.1 – Зображення, одержане у видимому діапазоні хвиль із супутника „Метеор”

Зображення, одержувані в ІЧ ділянці спектра. Інфрачервоні знімки являють собою візуалізовану форму теплових контрастів об'єкта. При реєстрації ІЧ інформації перетворення відеосигналу в зображення проводиться так, щоб більш світлі ділянки знімка відповідали об'єктам з більш низькою радіаційною температурою, а більш темні ділянки – об'єктам з більш високою температурою (рис. 2.2).

Чутливість інфрачервоних систем до теплових контрастів і визначає

ряд характеристик інфрачервоних зображень. Отримані ІЧ знімки, як правило, мають меншу роздільну здатність на місцевості в порівнянні із зображеннями видимого діапазону, а, отже, мають і меншу інформативність. Однак можливість одержання знімків у світлий і темний час доби робить цю інформацію основною при використанні її в аналізі. Знімки надходять у централізованому або автономному режимі. Зйомка здійснюється за допомогою сканувальної апаратури, тобто поелементно.

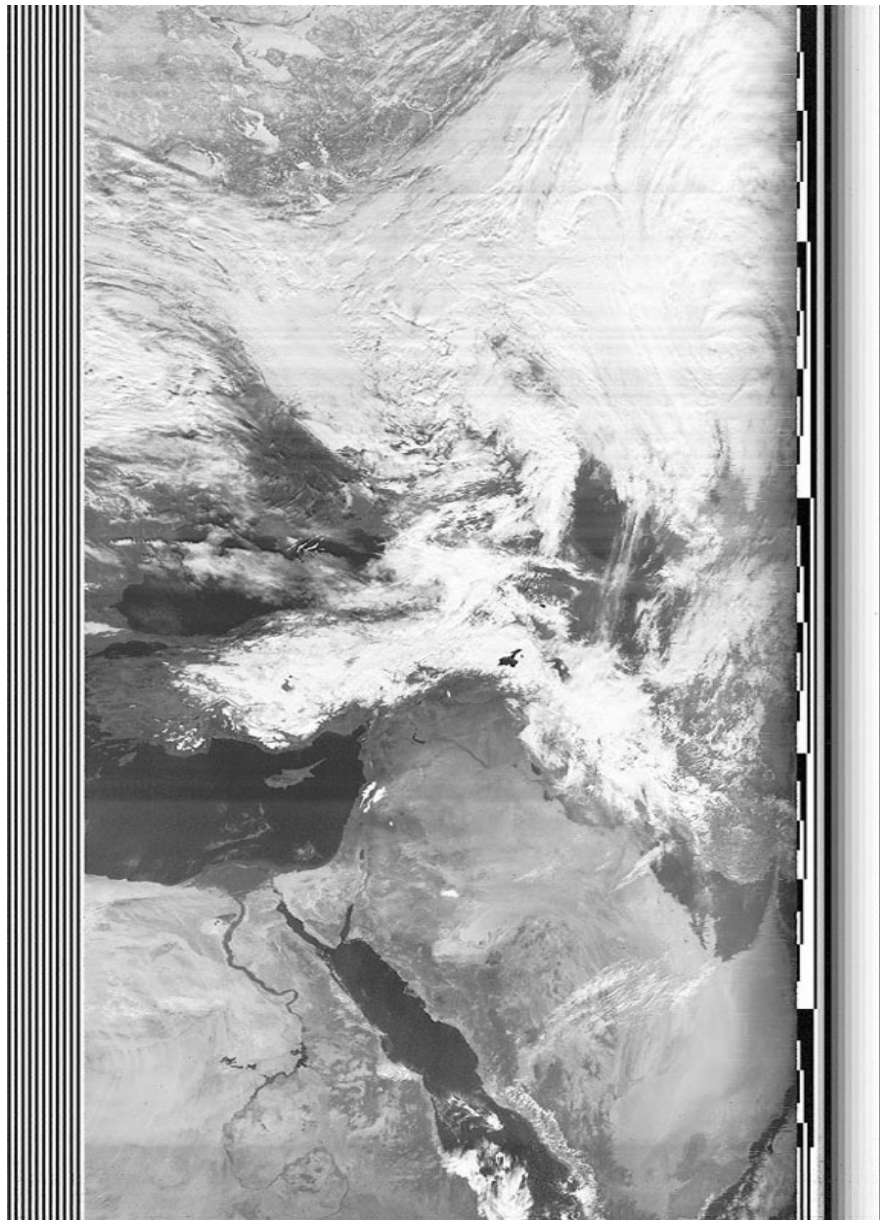


Рис. 2.2 – Зображення, одержане в ІЧ діапазоні хвиль із супутника „Ресурс”

Одержання безперервного зображення уздовж усього витка суттєво полегшує процес подальшої обробки знімків. На полях фотоплівки поруч із зображенням у вигляді темних і світлих рисок, паралельних рядкам

сканування, фіксуються у двійковому коді хвилинні мітки часу. У режимі безпосередньої передачі локалізація знімка здійснюється за часом приймання зображення та відомостям, отриманим зі спеціальних телеграм, переданих національними службами погоди.

Сканувальний інфрачервоний радіометр супутника „Метеор” забезпечує одержання знімка із захопленням на місцевості 2600 км і відрізненням 8 км у надирі. Масштаби реєстрованих зображень по рядкові від $1:11,5 \cdot 10^6$ у центрі до $1:48 \cdot 10^6$ на краях, по кадру $1:19,5 \cdot 10^6$.

Інфрачервоні знімки, отримані із супутника NOAA, мають такі ж характеристики, як і оптичні знімки, отримані із цього супутника в режимі безпосередньої передачі, тобто захоплення на місцевості 3000 км і відрізнення 4 км по всьому полю. Масштаби зображень по рядкові $1:15 \cdot 10^6$, по кадру $1:12,5 \cdot 10^6$.

Космічні ІЧ знімки, одержувані з геостаціонарних супутників серії ГОЕС, мають відрізнення $9,0 \times 9,0$ км і передаються в режимі безпосередньої передачі.

В *основі багатоспектральної (багатозональної) зйомки* лежить одержання ряду роздільних зображень у вузьких ділянках спектра того самого об'єкта (рис. 2.3). Багатоспектральна зйомка є в наш час найбільш перспективним методом у вивченні Землі та надзвичайних ситуацій з космосу. Особливістю зображень, одержуваних у декількох спектральних інтервалах, є повнота інформації і вірогідність, що забезпечується вибором спектральних ділянок і високою роздільною здатністю знімальної апаратури.

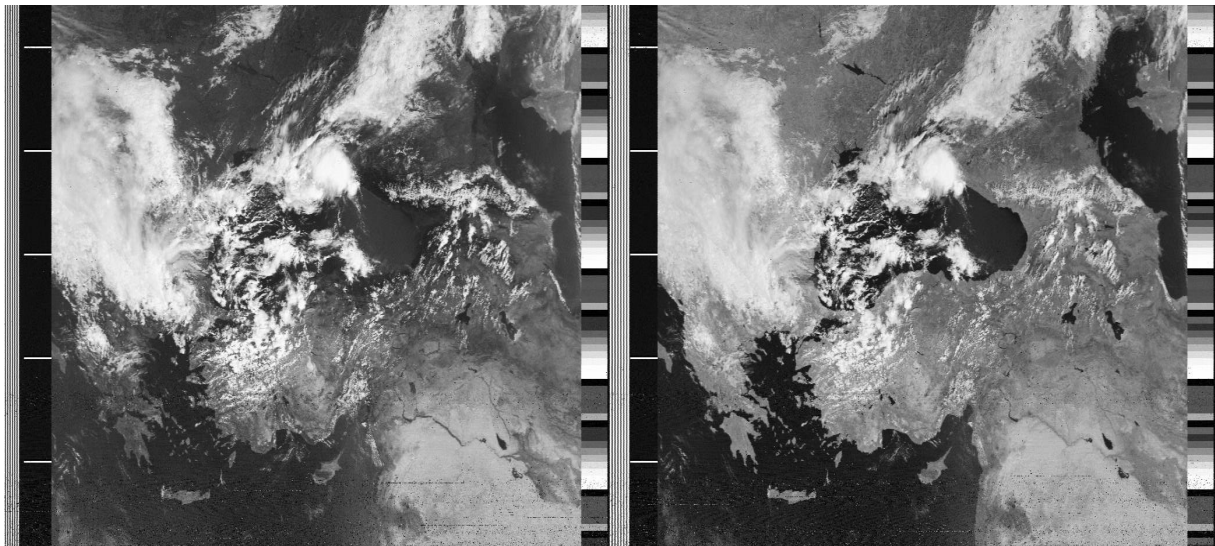


Рис. 2.3 – ІЧ знімок із супутника NOAA-17 тієї самої ділянки земної поверхні у двох спектральних діапазонах

Чотириканальне оптико-механічне сканувальне обладнання малого

відрізнєння ШСЗ „Метеор” дає можливість одержати знімок із захопленням на місцевості 2000 км і відрізнєнням у надирі $1,0 \times 1,7$ км. Двоканальне оптико-механічне обладнання середнього відрізнєння, установлене на цьому ж супутнику, забезпечує менше захоплення на місцевості – 1400 км при відрізнєнні знімка в надирі $0,28 \times 0,28$ км.

Масштаб зображень чотириканального обладнання малого відрізнєння супутника „Метеор” $1:11 \cdot 10^6$ по рядкові та $1:13 \cdot 10^6$ по кадру. Обладнання середнього відрізнєння цього супутника забезпечує одержання знімка в масштабі $1:3 \cdot 10^6$.

Багатоспектральна сканувальна система, використовувана на супутниках „Лендсат”, має просторове відрізнєння 70...100 м і ширину огляду близько 185 км.

Зображення, одержувані в мікрохвильовій ділянці спектра. Півтонові або псевдокольорові зображення, сформовані з поля радіояскравих температур, являють собою форму теплових контрастів об'єкта (рис. 2.4). Вимірювання мікрохвильового випромінювання можуть проводитися в різних режимах: вимірювання в надир і вимірювання в режимі сканування. На супутнику „Метеор” виміри поля радіояскравісних температур здійснюються в діапазоні 0,8 см. Реєстрація здійснюється в режимі сканування по дузі під кутом 40° до надира.

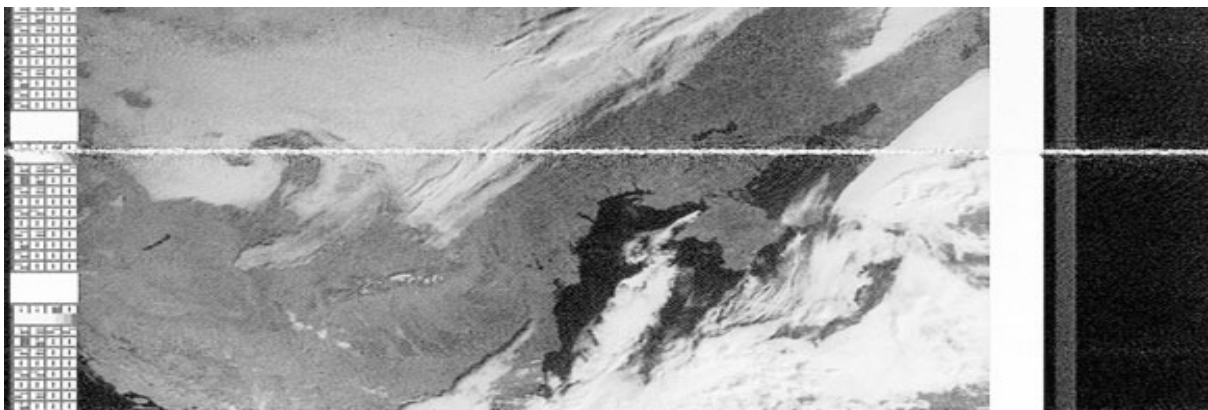


Рис. 2.4 – Зображення, отримане в мікрохвильовій ділянці спектра (0,8 см) із супутника „Січ” (Океан–О)

По зовнішньому вигляду мікрохвильові зображення схожі на інфрачервоні знімки з малим відрізнєнням. Вони також являють собою безперервну смугу огляду уздовж проекції орбіти супутника. Ширина смуги огляду 700 км, розмір знімка на місцевості 15×20 км. Важливою відмітною рисою мікрохвильових зображень є зображення материків (суші) яскраво-білим тоном без півтонів (за винятком Антарктиди) із чітко обкресленою береговою лінією, добре видимою крізь хмари.

2.3 Радіаційні, спектрометричні та мікрохвильові дані

Радіаційні дані. Радіаційні виміри проводяться в довгохвильовому вікні прозорості 8...12 мкм. Вимірювання інфрачервоного випромінювання за допомогою сканувального ІЧ радіометра, встановлюваного на супутнику „Метеор”, дозволяють одержати поле радіаційних температур підстильної поверхні, і дані, необхідні для розрахунків верхньої границі хмар.

Ширина смуги огляду отриманих радіаційних карт і відрізнєння на місцевості такі ж, як і для інфрачервоних зображень. Це пояснюється використанням однієї й тієї ж апаратури – ІЧ радіометра для зйомки.

Цифрові карти радіаційної температури підстильної поверхні та висоти верхньої границі хмар випускаються в масштабі $1:3 \cdot 10^7$. Дані на цих картах нанесені у вузлах регулярної сітки із кроком 250 км. Для північної і південної півкулі використовується стереографічна проекція, а для тропічної зони – меркаторська проекція карти.

Спектрометричні дані. Спектрометричні виміри дозволяють одержати в глобальному масштабі відомості про вертикальний розподіл температури та вологості повітря, озону і ін. Найбільш широко застосовуються виміри в смугах поглинання вуглекислого газу 4,3 і 15,0 мкм. Дифракційні спектрометри, що працюють у смугах поглинання CO_2 , можуть мати від 4 до 30 каналів вимірів, що практично забезпечує відновлення вертикального профілю температури до досить більших висот. Для одержання даних про розподіл вологості в атмосфері використовуються спектрометричні виміри в смугах 6,5...7,0 і 20...23 мкм. Спектральні виміри випромінювання у діапазоні хвиль 6...20 мкм дозволяють відновити вертикальний профіль озону (до висоти 25 км) і водяної пари (до висоти 9 км). Результати спектрометричних вимірів у різних смугах поглинання (ділянках спектра) можуть бути представлені у вигляді таблиць або карт. Спектрометричні виміри із супутника забезпечують точність виміру випромінювання до 0,5...1,0%. При виробництві спектрометричних вимірів апаратура звичайно має каліброване еталонне джерело випромінювання. Калібрування вимірювальної апаратури дає можливість встановити зв'язок між інтенсивністю радіації та вихідним сигналом радіометра і визначити середню квадратичну помилку вимірів. Значення середньої квадратичної похибки для подібних вимірів при відсутності хмарності близько 2°C , при наявності хмар вона трохи більше.

Методи обробки спектрометричних даних передбачають широке використання електронно-обчислювальної техніки. Первинна обробка, географічна та часова прив'язка інформації виконуються по заздалегідь розроблених схемах.

На супутниках серії „Метеор” може встановлюватися спектрометр-

інтерферометр (СІ апаратура). Апаратура має кілька каналів вимірів у діапазоні 6,25...25,0 мкм. Роздільна здатність її 36×40 км. Дані, отримані в цьому діапазоні хвиль, використовуються для побудови вертикальних профілів температури і визначення вмісту водяної пари та озону в атмосфері.

Мікрохвильові дані. Для виробництва вимірів на супутниках установлюються триканальні мікрохвильові радіометри (НВЧ апаратура). Багатоканальні виміри в надирі ($\lambda = 0,8; 1,35; 8,5$ см) можуть проводитися окремо або одночасно з вимірами ІЧ випромінювання у вікні прозорості атмосфери 8...12 мкм.

Мікрохвильова інформація може бути представлена для аналізу у вигляді профілю, просторово-часового графіка і цифрової карти поля радіояскравих температур. Характеристики цієї інформації залежать від способу вимірювання, використовуваного на конкретному супутнику. Так, при вимірюванні в режимі сканування інтенсивності мікрохвильового випромінювання системи Земля–атмосфера на $\lambda = 0,8$ см при висоті польоту супутника $H = 600$ км ширина смуги огляду близько 700 км при роздільній здатності радіометра на місцевості 15×20 км. При поляризаційних вимірах у каналі випромінювання $\lambda = 0,8$ см смуга огляду на місцевості близько 1000 км і відрізнення даних 24×30 км.

Якщо виміри проводяться в надир для каналів $\lambda = 1,35$ і 8,5 см, відрізнення відповідно 90×90 і 100×100 км. Отримана в мікрохвильовому діапазоні інформація дозволяє одержати відомості про вологовміст в атмосфері, про просторовий розподіл зон опадів і їх інтенсивності, про інтегральну водність хмар, положення границь крижаного покриву і його згуртованості.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні види аерокосмічної інформації
2. Перелічіть основні вимоги до аерокосмічної інформації
3. Охарактеризуйте зображення, отримані у видимій ділянці спектра електромагнітних хвиль
4. Охарактеризуйте зображення, отримані в інфрачервоній ділянці спектра електромагнітних хвиль
5. Охарактеризуйте зображення, отримані в мікрохвильовій ділянці спектра електромагнітних хвиль
6. Що лежить в основі багатоспектральної зйомки ?
7. Чим є радіаційні дані ?
8. Чим є спектрометричні дані ?
9. Чим є мікрохвильові дані ?

3 СУЧАСНІ ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ КОСМІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

3.1 Призначення, можливості і склад станції КОСМЕК

Станція КОСМЕК (рис. 3.1) призначена для приймання зображень Землі, переданих з полярно-орбітальних супутників серії NOAA, Метеор, Ресурс, Океан у форматі АРТ (Automatic Picture Transmission) у діапазоні 137...138 МГц.



Рис. 3.1 – Загальний вигляд робочого місця станції КОСМЕК

Формат АРТ – аналоговий. Інформація передається за допомогою комбінованої амплітудно-частотної (АМ/ЧМ) модуляції випромінювання із шириною смуги близько 40 кГц. Наприклад, в одному сеансі із супутника NOAA апаратурою сканера-радіометра високого відрізнєння AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) передаються зображення двох спектральних каналів з п'яти: видимого VIS (у денний час доби) або середнього інфрачервоного (NOAA) і далекого інфрачервоного IR зі зменшеним просторовим (до 4 км) і радіометричним (до 8 біт) відрізнєнням у смузі огляду близько 3000 км.

Отримана інформація може бути використана в гідрометеорологічних центрах (регіональних, державних, обласних), авіаційних, залізничних, морських і автомобільних підприємствах, аерофотознімальних загонах,

рибальських організаціях, навчальних закладах (школах і вузах), науково-дослідних організаціях і екологічних центрах.

Основні області застосування одержаної інформації:

- екологічна оцінка стану природного середовища,
- гідрометеорологічні прогнози,
- навчання технологіям дистанційного моніторингу,
- наукова праця.

Основна тематика знімків:

- наочне вивчення місця розташування географічних об'єктів і їх характеристик,
- моніторингові дослідження режимів природнокліматичних і ландшафтних зон (зіставлення з наявними картографічними даними),
- спостереження за станом великих водних об'єктів, їх гідро– і термодинамічними режимами,
- спостереження за станом великих рослинних масивів і іригаційних систем,
- метеорологічний і кліматичний моніторинг,
- льодовий режим морів,
- спостереження за просторово-часовим розподілом снігового покриву,
- спостереження за великими надзвичайними подіями і екологічними катастрофами (повені, посухи, лісові пожежі, забруднення морських вод нафтопродуктами, заморозок, урагани, тумани, ожеледь і пилові буревії),
- спостереження за геоморфологічними та погодоутворювальними характеристиками великих гірських масивів.

Для тих, хто використовує космічну інформацію, станція КОСМЕК є зручним інструментом її одержання.

Станція одержує із супутника зображення навколишньої її території 10...12 раз на добу при куті місця космічного апарата над об'єктом більше 5°.

Час знаходження супутника в зоні видимості пункту приймання, залежно від кута місця, становить від 6 до 15 хвилин.

Зразкові зони покриття супутників при прийманні інформації в м.Одесі наведені на рис. 3.2 і 3.3.

Обсяг інформації, одержуваної за один сеанс зв'язку, тобто поки супутник проходить через зону видимості станції, може становити 3...20 МБ.

На Україні станція дозволить спостерігати територію від Піренеїв до Уральських гір по довготі та від Північної Африки до Скандинавії по широті. Отримані знімки можуть бути як чорно-білими, так і псевдокольоровими в картографічній проекції масштабу 1:10⁶.



Рис. 3.2 – Приклад покриття зйомкою для одного супутника за 1 день



Рис. 3.3 – Приклад покриття зйомкою для одного супутника за 7 днів

До складу пункту прийому входить (рис. 3.4):

- антена з малошумним підсилювачем і редуктором,
- блок управління антеною,
- приймач,
- комп'ютер,
- програмне забезпечення

У комплект поставки входить:

- антена з підсилювачем і редуктором повороту – 1 шт.,
- блок управління антеною – 1 шт.,
- високочастотний кабель (50 Ом) – 30 м,
- приймач – 1 шт.,
- блок живлення – 1 шт.,
- сполучні кабелі – 2 шт.,
- мультимедійний диск із програмним забезпеченням – 1 шт.

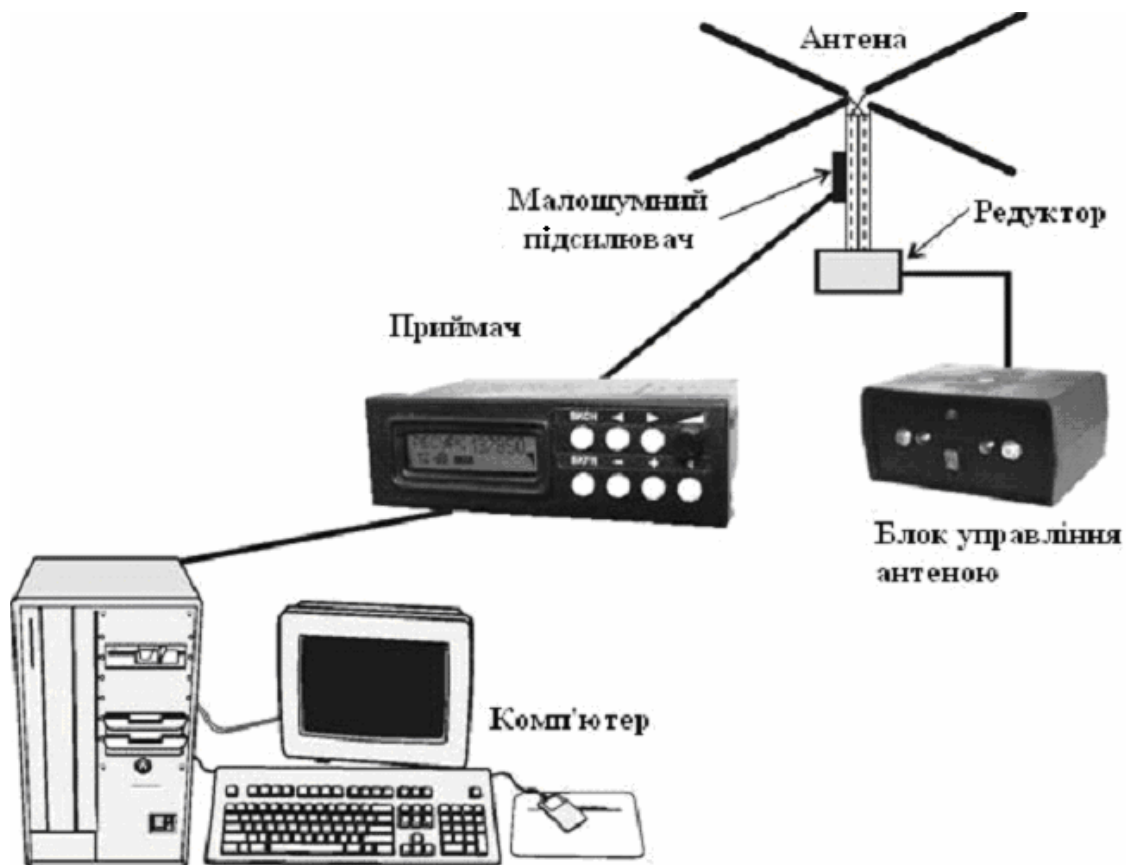


Рис. 3.4 – Склад станції КОСМЕК

Антена. Забезпечує приймання радіосигналів від полярно-орбітальних супутників, коли поляризаційні характеристики приходячої хвилі та напрямок приходу не є заздалегідь відомим.

Антену побудовано на основі двох напівхвильових диполів, що

лежать в одній площині й осі яких взаємно перпендикулярні, з оптимально розташованим рефлектором.

Така конструкція антени (рис. 3.5) має майже точно кругову діаграму направленості в горизонтальній площині.

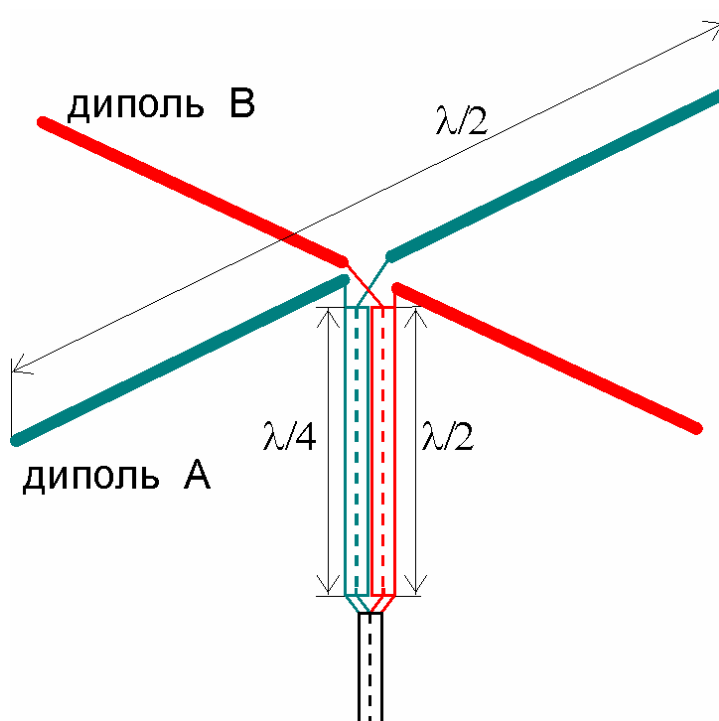


Рис. 3.5 – Конструкція антени

Діаграми направленості антени в горизонтальній і вертикальній площині наведені на рис. 3.6 і 3.7. Для одержання кругової діаграми направленості вібратори антени слід збуджувати зі зсувом фаз в 90° . Цей зсув фаз досягається за рахунок включення між обома вібраторами чотирьоххвильових шлейфів з урахуванням коефіцієнта вкорочення. У цьому випадку хвильовий опір шлейфа дорівнює входному опору окремого вібратора і вібратори виявляються погодженими з лінією та живлять її зі зсувом фаз в 90° .

Оскільки обидва вібратора з'єднані паралельно, то й опір антени в точці живлення рівняється 50 Ом для простих напівхвильових вібраторів. Через складність живлення цієї антени, а також через те, що лінії зв'язку мають електричні параметри, що залежать від частоти, отже, вся антена в цілому має досить вузьку смугу пропускання, необхідну для приймання радіосигналу в діапазоні 137...138 МГц.

Слід мати на увазі, що при прийманні лінійно поляризованої хвилі рівень прийнятого сигналу знижується на 3 дБ. Якщо ж напрямок обертання поляризації приходячої хвилі протилежний тому, на яке розрахована дана антенна система, то можна очікувати значного

ослаблення (до 40 дБ) рівня прийнятого сигналу.

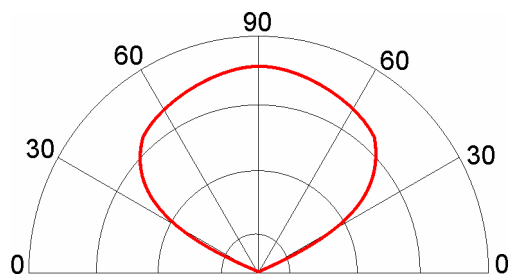


Рис. 3.6 – Діаграма направленості антени у вертикальній площині

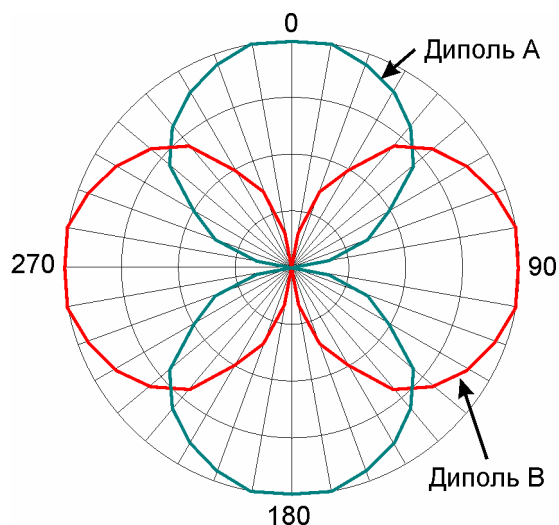


Рис. 3.7 – Діаграма направленості антени в горизонтальній площині

Станція може комплектуватися антенами, різними по конструкції. На рис. 3.8, 3.9 і 3.10 представлені зовнішні вигляди антен.

Характеристики хрестоподібної стаціонарної антени:

- поляризація – кругова правобічна,
- коефіцієнт підсилення антени – 3,7 дБ,
- коефіцієнт підсилення підсилювача – 20 дБ,
- габарити – $1,5 \times 1,0 \times 1,0$ м,
- маса – 1,2 кг.

Характеристики квадрофілярної антени:

- поляризація – кругова правобічна,
- коефіцієнт підсилення антени – 4,0 дБ,
- коефіцієнт підсилення підсилювача – 20 дБ,
- габарити – $1,0 \times 0,2 \times 0,2$ м,
- маса – 0,8 кг.

Характеристики хрестоподібної переносної антени:

- поляризація – кругова правобічна,
- коефіцієнт підсилення антени – 3,7 дБ,
- коефіцієнт підсилення підсилювача – 20 дБ,
- габарити – $1,5 \times 1,0 \times 1,0$ м,
- маса – 1,2 кг.

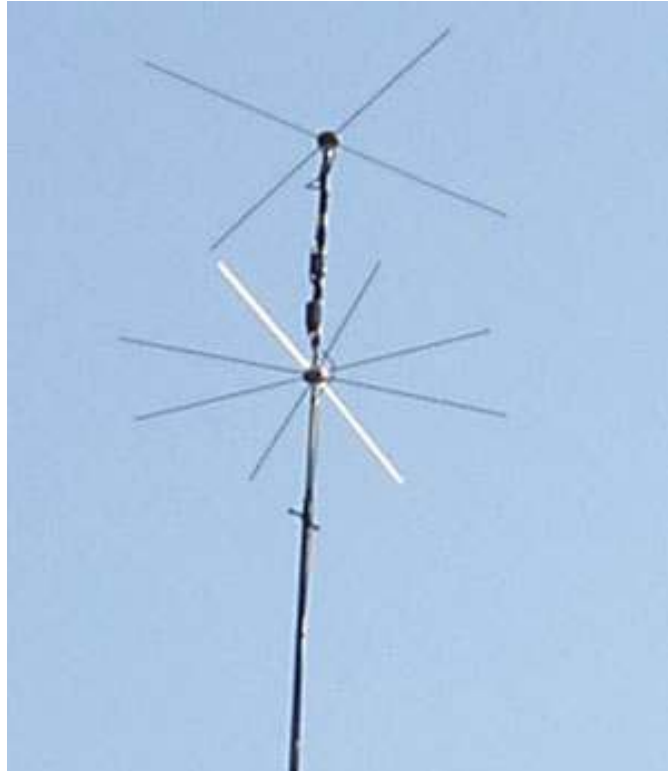


Рис. 3.8 – Хрестоподібна стаціонарна антена



Рис. 3.9 – Квадрофілярна стаціонарна антена



Рис. 3.10 – Хрестоподібна переносна антена

Блок управління антеною. При русі супутника по орбіті можлива траєкторія польоту (лінія на рис. 3.11) коли супутник пролітає під кутом 45 градусів до взаємно-перпендикулярних диполів антени. Тоді, щоб не було втрати сигналу при куті місця $0 \dots 5$ градусів, необхідно повернути антену в горизонтальній площині на кут стійкого приймання сигналу. Для цього призначений блок управління антеною (рис. 3.12).

Основні характеристики блоку управління антеною:

- живлення – 220 В,
- вихідна напруга – 26 В,
- споживаний струм – 250 мА,
- габарити – $155 \times 138 \times 60$ мм,
- маса – 0,950 кг.

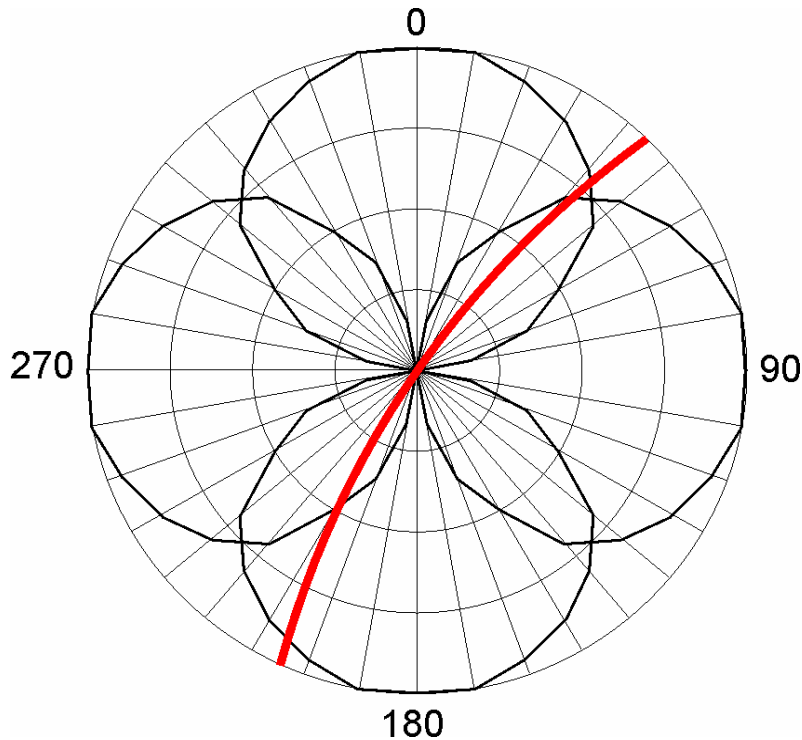


Рис. 3.11 – Траєкторія найгіршої якості приймання інформації із супутника

Малошумний антенний підсилювач працює на частоті 137...138 МГц і забезпечує достатній коефіцієнт підсилення для компенсації ослаблення сигналу від антени в сполучному кабелі і роз'ємах, придушення перешкод поза частотним діапазоном, а також перешкоджає появі в основному приймачі інтермодуляційних викривлень. Як правило, додатковий антенний підсилювач використовується при довжині сполучних кабелів більш 20 метрів. Підсилювач одержує живлення через сигнальний кабель від приймача і установлений на щоглі антени. Принципова схема показана на рис. 3.13.

Приймач. Забезпечує посилення прийнятого антеною сигналу із супутника, його частотну демодуляцію та видачу сигналу в комп'ютер (рис. 3.14...3.19).

Технічні характеристики приймача:

1. Частота переносної (МГц) – 137,00...138,00,
2. Сканування по частотах (МГц) – 137,1000; 137,3000; 137,4000; 137,5000; 137,6200; 137,8500; 137,9125,
3. Сканування по частоті з дискретністю 2,5 кГц у діапазоні частот (МГц) – 137,00...138,00,
4. Автоматичний і ручний пошук по частоті із кроком 5 і 0,5 секунд,
5. Програмована сітка частот,
6. Чутливість (мкВ) – 0,2,
7. Вид модуляції переносної – ЧМ,
8. Девіація частоти (кГц) – ± 17 ,

9. Частота підпереносної (кГц) – $2,4 \pm 0,3$,
10. Вид модуляції підпереносної – АМ-ДБП,
11. Смуга частот (кГц) – 1,6,
12. Частота рядків зображення – 120 рядків/хв.,
13. Живлення – 9 В (220 В),
14. Споживаний струм – 60 мА,
15. Габарити – 140×90×40 мм,
16. Маса – 0,4 кг,
17. Управління приймачем з комп'ютера через порт RS232 (COM1, COM2).

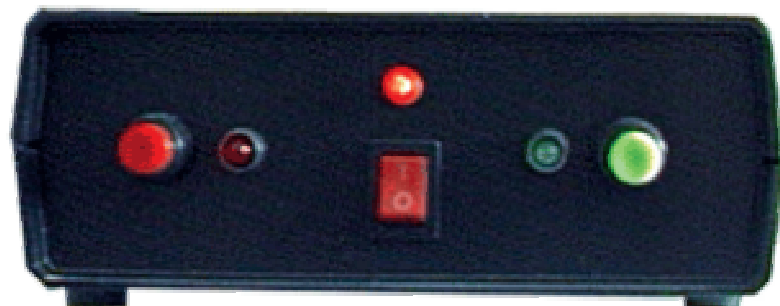
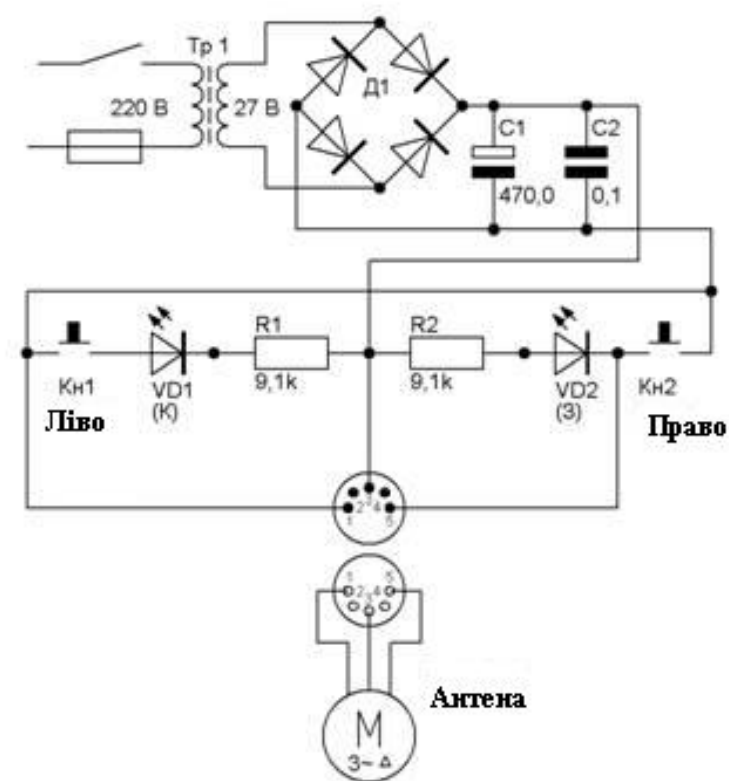


Рис. 3.12 – Принципова схема та зовнішній вигляд блоку управління антеною

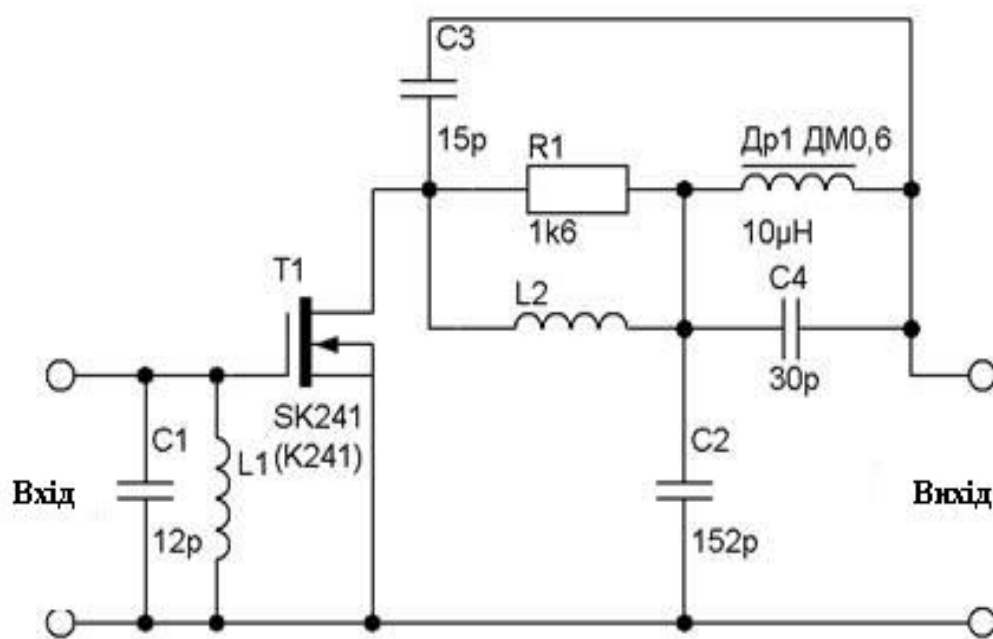


Рис. 3.13 – Принципова схема антенного підсилювача



Рис. 3.14 – Загальний вигляд приймача



Рис. 3.15 – Вигляд передньої панелі приймача



Рис. 3.16 – Вигляд задньої панелі приймача



Рис. 3.17 – Вигляд приймача зі знятою кришкою з боку деталей

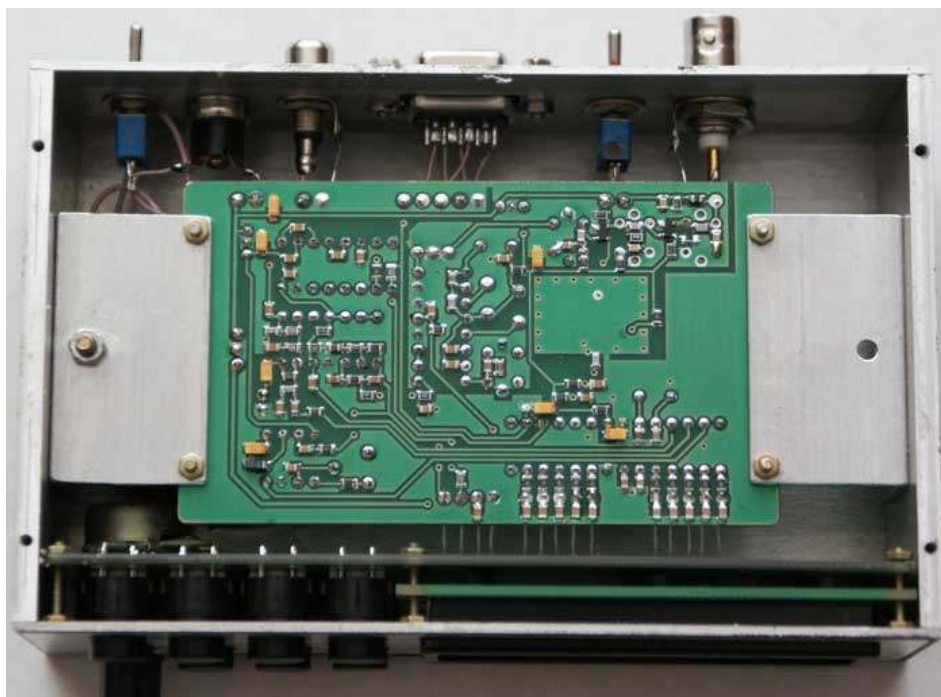


Рис. 3.18 – Вигляд приймача зі знятою кришкою з боку друкованого монтажу



Рис. 3.19 – Комплектація приймача

3.2 Програмне забезпечення і вимоги до комп'ютера

Вимоги до комп'ютера наступні:

- операційна система – Windows 95/98/ME/NT/2K/XP,
- процесор Intel 486 або Pentium,
- RAM 32 МБ (найкращий варіант 128 МБ і більш),
- звукова карта (sound card) – 11,025 кГц, моно,
- графічна карта (graphic card) – 256 кольорів і більше.

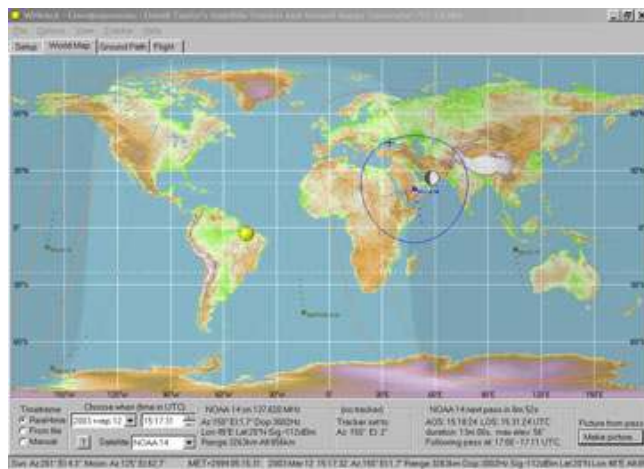
Програмне забезпечення поставляється на мультимедійному диску (рис. 3.20).



Рис. 3.20 – Мультимедійний диск із програмним забезпеченням

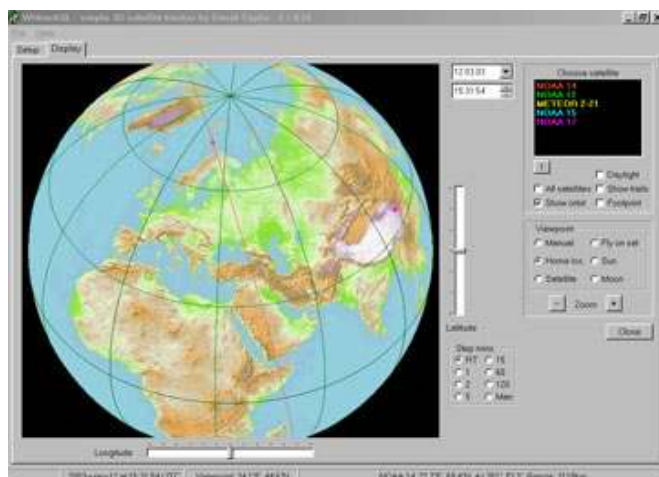
До складу програмного забезпечення входять наступні програми.

WXtrack



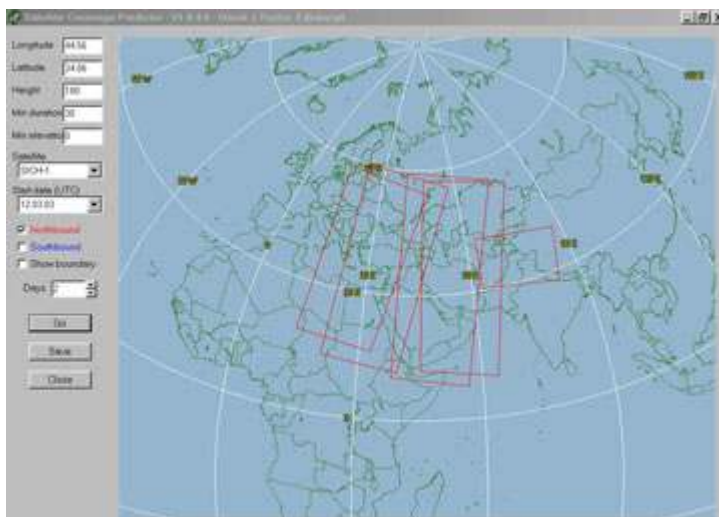
Програма призначена для розрахунків розкладу проходження супутників через зону видимості станції по орбітальних елементах (ефемеридам) супутників з можливістю їх відновлення через Internet.

WXtrackGL



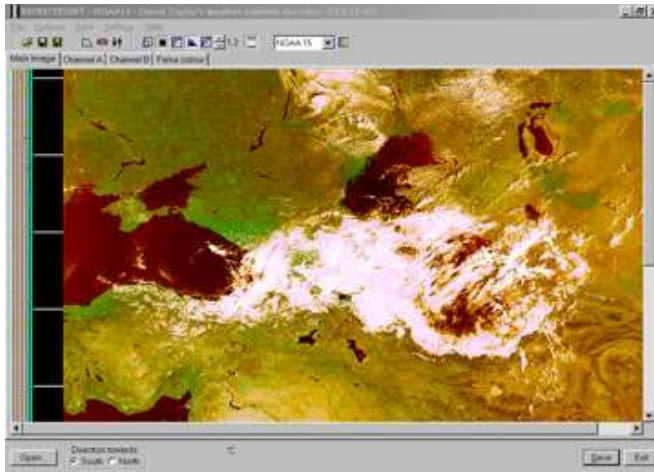
Тривимірний дисплей програми WXtrack.

SatCover



Програма призначена для складання картограм.

SatSignal



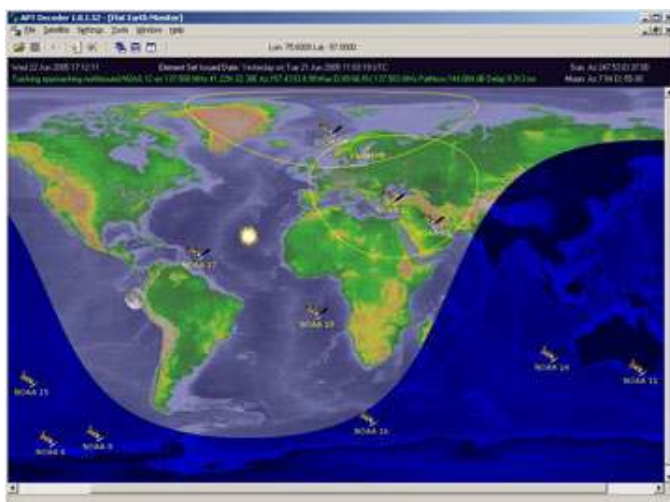
Програма призначена для декодування та обробки файлів типу *.wav, отриманих програмою WXSat з полярних або геостационарних погодних супутників.

WXtoImg



Програма призначена для приймання та декодування АРТ сигналів з метеорологічних супутників з використанням „Sound card” і з наступним записом їх у файл типу *.wav.

APT Decoder



Програма призначена для приймання та декодування АРТ сигналів з метеосупутників з використанням „Sound card” і з наступним записом їх у файл типу *.wav.

Програма призначена для дистанційного управління приймачем з комп'ютера через порт RS232 (COM1, COM2).

3.3 Характеристики та принцип роботи станції КОСМЕК

У табл. 3.1 представлені узагальнені характеристики радіолінії (борт-земля) у режимі АРТ.

Таблиця 3.1 – Характеристики станції КОСМЕК

Параметри	Космічні апарати	
	NOAA	Метеор, Океан, Ресурс
Частота переносної	137,10; 137,50; 137,62; 137,9125 МГц	137,30; 137,40; 137, 85 МГц
Поляризація передавальної антени	права кругова	права кругова
Коефіцієнт підсилення антени	3,7 дБ	3,7 дБ
Потужність передавача	5 Вт	5...10 Вт
Вид модуляції переносної	ЧМ	ЧМ
Девіація частоти	± 17 кГц	± 15 кГц
Частота підпереносної	$2400 \pm 0,3$ Гц	$2400 \pm 0,3$ Гц
Індекс модуляції підпереносної	$87 \pm 5\%$	$87 \pm 5\%$
Вид модуляції підпереносної	АМ–ДБП	АМ–ДБП
Смуга частот сигналу, що модулює	1,6 кГц	1,6 кГц
Частота рядків зображення	120 рядків/хв	120 рядків/хв
Роздільна здатність переданого зображення	4 км	4 км

Сигнал від антени через малошумний антенний підсилювач А0 надходить на вхід приймача (рис. 3.21). Приймач являє собою супергетеродин з подвійним перетворенням частоти. Для забезпечення гарного придушення дзеркального каналу перша проміжна (ПЧ) частота обрана 10,7 МГц. Перший гетеродин складається з генератора G1 із синтезатором частот із кварцовою стабілізацією частоти (10 МГц) який створює коливання з частотою 126,3...127,3 МГц. Коливання частотою 126,3...127,3 МГц із гетеродину подаються на змішувач U1. Сюди ж через вхідний фільтр Z1 надходять сигнали із супутника (137,0...138,0 МГц). Перетворений змішувачем U1 спектр проміжних частот лежить на частоті 10,7 МГц. Смуга пропускання першої ПЧ визначається фільтром Z2 і

підсилювачем A1. Керамічний фільтр Z2 має смугу пропущення 40 кГц і включений між першим U1 і другим U2 змішувачами. Другий гетеродин G2 має кварцову стабілізацію частоти. У ньому використаний кварцовий резонатор на частоту 10,245 МГц, що відповідає другій проміжній частоті 455 кГц.

З виходу змішувача U2 сигнал подається на підсилювач A2 і далі на динамік і підсилювач A3 і далі на вхід звукової карти SC комп'ютера для подальшої обробки сигналу.

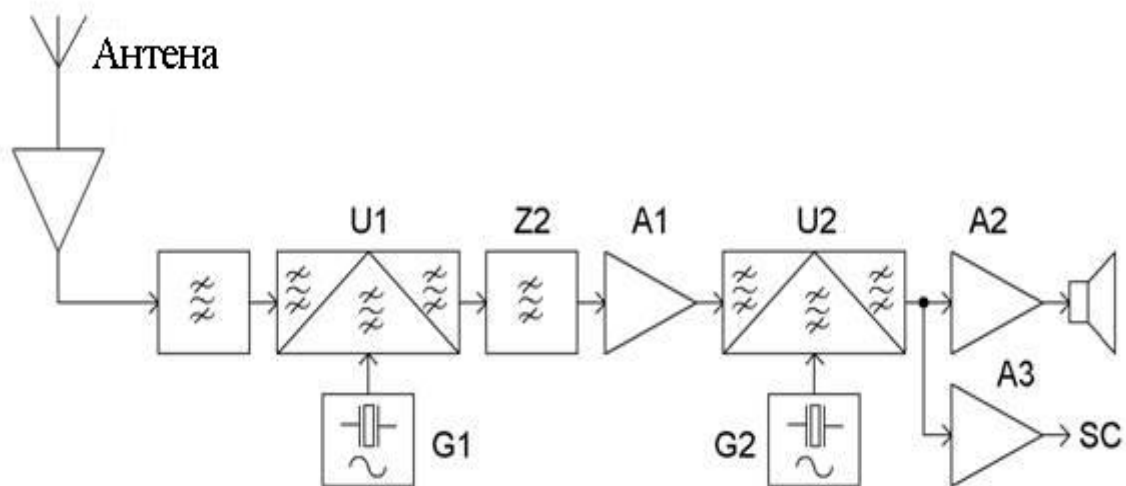


Рис. 3.21 – Функціональна схема станції

Принципова схема приймача наведена на рис. 3.22. Вхідний сигнал із частотою 137...138 МГц надходить на вхід підсилювача, зібраного на транзисторі SK241 і далі через смуговий фільтр на змішувач, зібраний на транзисторі КП327. На другий вхід змішувача надходить сигнал з гетеродину, зібраного на транзисторах SK241 і KT368 і синтезатора частот, зібраного на мікросхемах AT90S4433-8PI і PLL.

З виходу першого змішувача сигнал через керамічний фільтр зі смугою пропущення 40 кГц надходить на підсилювач, зібраний на транзисторі SK241 і далі на мікросхему MC3371 (частотний демодулятор), яка детектує звуковий сигнал. Звуковий сигнал надходить на операційний підсилювач LM324 і далі на динамік і звукову карту комп'ютера (рис. 3.23).

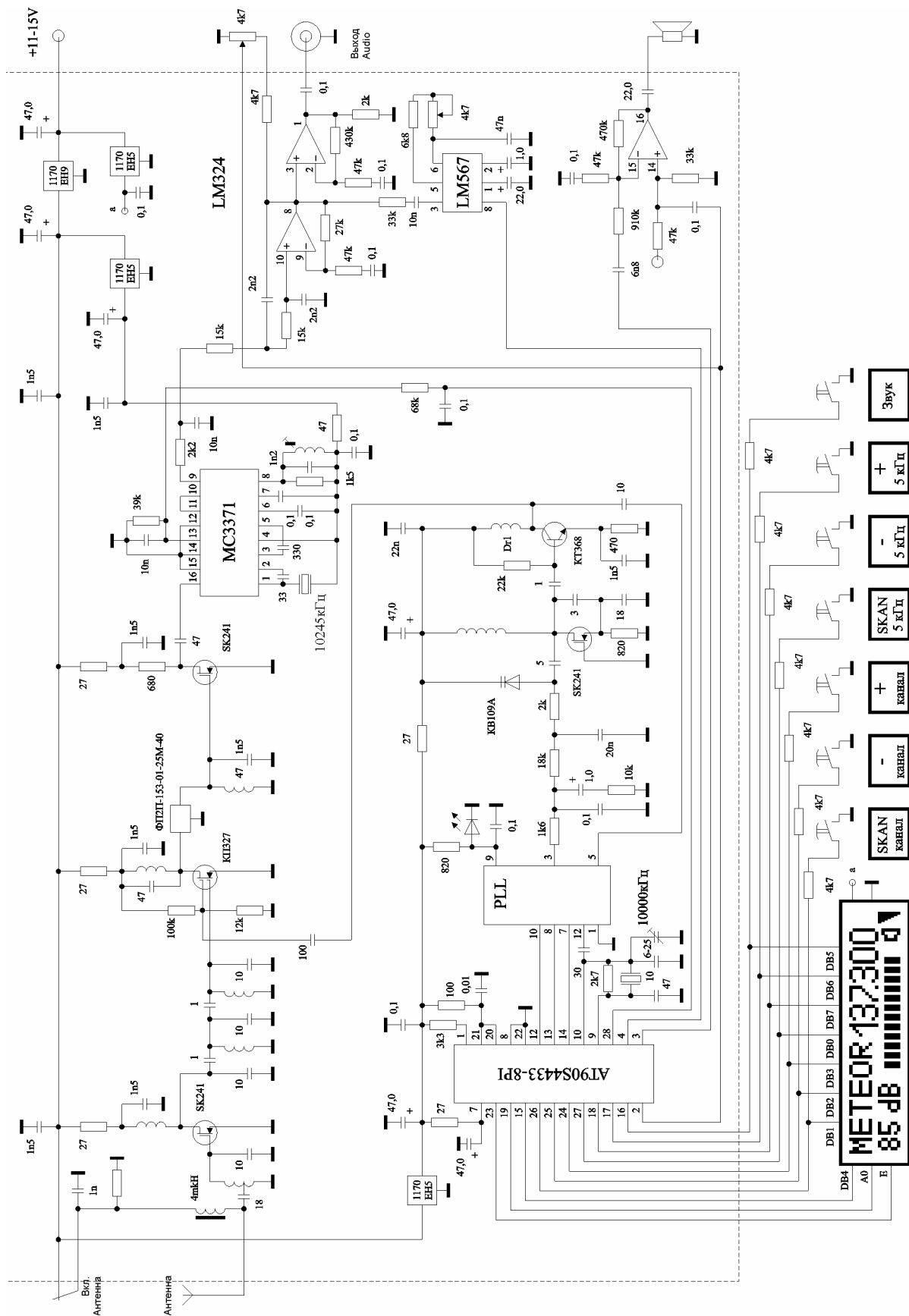


Рис. 3.22 – Принципова схема станції

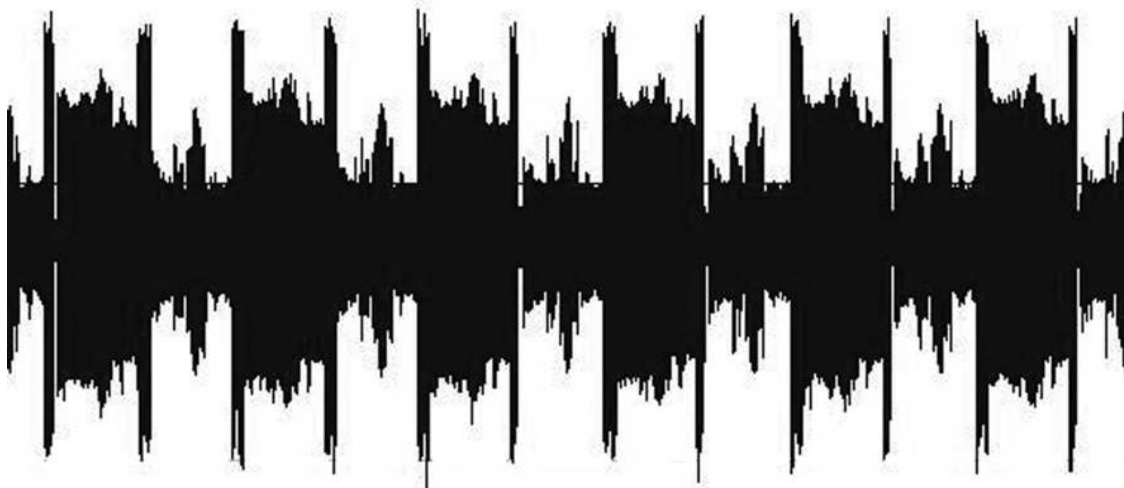


Рис. 3.23 – Вигляд сигналу, що надходить на комп'ютер

Контрольні запитання

1. Для чого призначена станція КОСМЕК ?
2. Які можливості станції КОСМЕК ?
3. Який склад станції КОСМЕК ?
4. Які характеристики станції КОСМЕК ?
5. Опишіть принцип роботи станції КОСМЕК
6. Опишіть основні області застосування інформації, одержуваної зі станції КОСМЕК
7. Опишіть основну тематику знімків, одержуваних зі станції КОСМЕК
8. Які вимоги до комп'ютера станції КОСМЕК ?
9. Опишіть склад програмного забезпечення станції КОСМЕК

4 ОСНОВИ ОБРОБКИ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

4.1 Основні характеристики зображень на космічних знімках

Для правильного та більш повного дешифрування знімків необхідно знати основні закономірності процесів відбиття і ослаблення у видимій ділянці спектра, випромінювання та ослаблення в інфрачервоному й мікрохвильовому діапазонах, відбивні та випромінювальні властивості різних підстильних поверхонь, а також характерні структурні риси об'єктів і підстильної поверхні.

При дешифруванні космічних знімків використовуються дешифрувальні ознаки. Основними дешифрувальними ознаками, що дозволяють розрізняти зображення різного типу та земної поверхні, є яскравість (тон) і рисунок (структура) зображення.

Яскравість (тон) зображення на космічних знімках залежить від ряду фізичних характеристик об'єкта. На знімках, отриманих у видимій ділянці спектра, яскравість визначається відбивними властивостями об'єкта і його освітленістю. На інфрачервоних знімках яскравість зображення залежить від теплового фону (температури поверхні) об'єкта.

На знімках, отриманих у видимій ділянці спектра, розрізняють 10...12 градацій відносної яскравості. Кількість градацій яскравості визначається досконалістю знімальної апаратури.

На відміну від знімків видимої ділянки спектра визначальним фактором тону інфрачервоного зображення є температура об'єкта. У цьому випадку тепловий фон, на якому ведеться зйомка, більш мінливий, ніж яскравий фон при зйомці у видимих променях. Природно, що тон зображення залежить від висоти об'єкта, наприклад від висоти вершин хмар, а також від кількості хмарності на площі, відповідної до елемента відрізнення. Тон зображення за інших рівних умов тим світліше, чим більше кількість хмар і чим вище їх верхня границя на відповідній ділянці спостережуваної поверхні; зміна тону для сусідніх елементів відрізнення пов'язана знов-таки за інших рівних умов або зі збільшенням кількості, або з ростом висоти хмар, або з обома факторами відразу.

Яскравість космічних зображень не є сама по собі достатньою дешифрувальною ознакою, по якій можна відрізнити на знімкові хмари від підстильної поверхні, суші та моря. Найбільш інформативними є різкі зміни тону по полю знімка, які формують рисунок (структуру) зображення.

Рисунок (структура) зображення створюється завдяки просторовій неоднорідності поля випромінювання і в основному обумовлений формою та розміром візованих об'єктів, енергетичним контрастом між ними. Рисунок зображення за інших рівних умов суттєво залежить також від технічних параметрів оглядової апаратури: роздільної здатності апаратури, числа відтворених градацій яскравості і т.д.

Зміна умов зйомки (освітленості або загального теплового тла, експозицій, автоматичного регулювання посилення та ін.) впливає на відтворюваність по шкалі півтонів і тим самим на структуру зображення. Зникають одні деталі, з'являються інші. Але в цілому *структура зображення більш стійка до зовнішніх факторів зйомки, ніж тон зображення*.

Неоднорідність у просторовому розподілі тону (яскравості) приводить до виникнення на космічних знімках рисунка різних масштабів. Виходячи з масштабів яскравісних неоднорідностей і роздільної здатності апаратури, виділяють три основні типи структури:

- текстуру,
- мезоструктуру,
- макроструктуру.

Текстура зображення. Під текстурою розуміють рисунок дрібних деталей зображення, створюваний відмінністю яскравості окремих елементів, розміри яких порівнянні з роздільною здатністю апаратури. Розрізняють чотири основні типи текстури: матову, зернисту, волокнисту та дендритну.

Матова текстура характеризується однорідним тоном зображення. Космічні знімки, що мають таку текстуру, відрізняються між собою тільки по яскравості. Матова текстура властива зображенням відкритих ділянок водної поверхні, однорідних ділянок суші, суцільних льодів і снігового покриву, туману і шарувато подібної хмарності (рис. 4.1). На ІЧ знімках матову текстуру можуть мати купчасті та шарувато-купчасті хмари в тому випадку, коли просвіти між хмарними елементами менше елементів відрізнєння або порівнянні з ними.

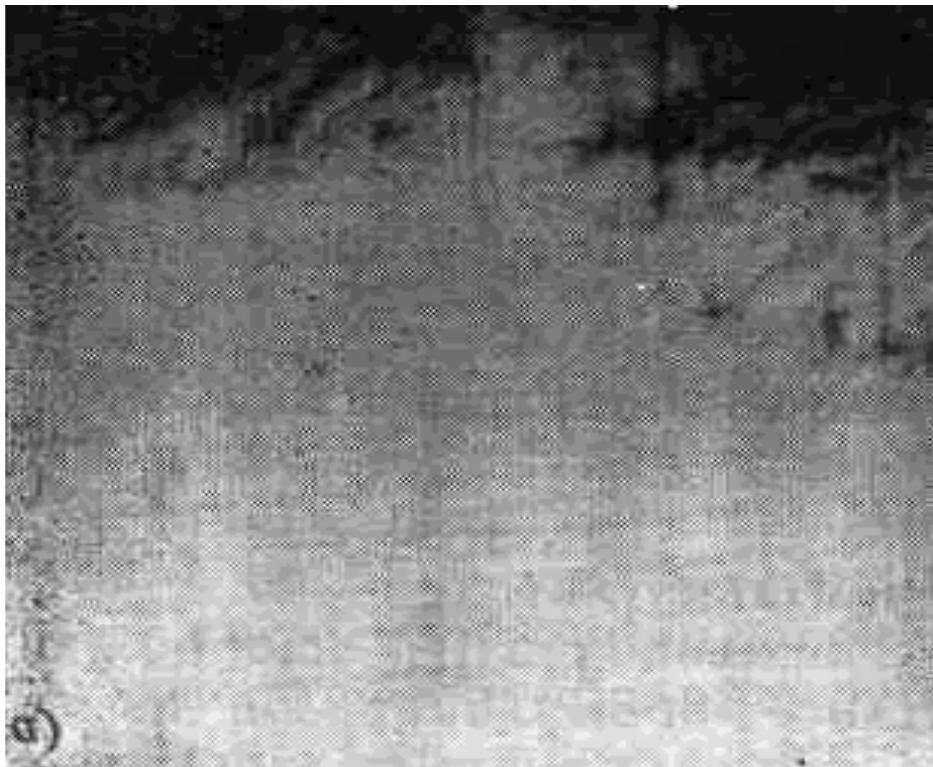


Рис. 4.1 – Матова текстура зображення (шарувато подібна хмарність)

Зерниста текстура – скупчення плям (зерен) світлого тону на відповідному тлі. Дрібні зерна звичайно характерні для зображень купчасто подібної хмарності (рис. 4.2), причому розміри зерен у цьому випадку настільки малі, що деталі форми окремих хмар повністю скрадаються.

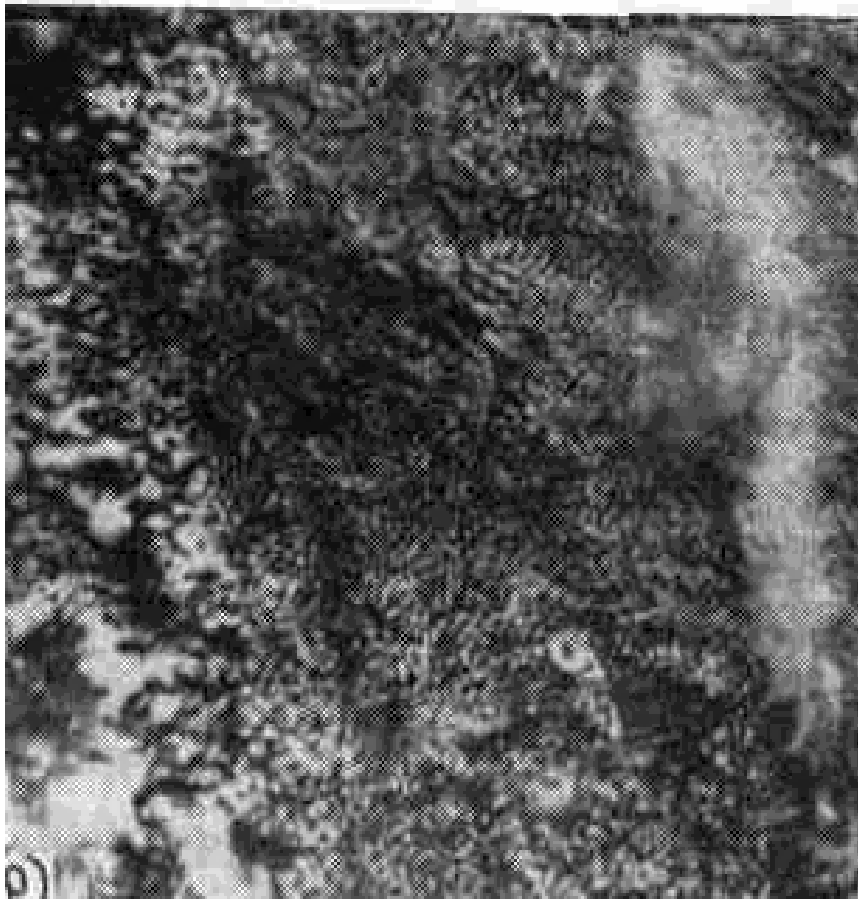


Рис. 4.2 – Зерниста дрібна та велика текстура зображення (купчасто подібна хмарність)

Іноді зернисту текстуру має на знімках дрібно битий морський лід; для таких зображень характерною ознакою є деяка незграбність і різкість контурів. Зерниста текстура, як правило, на ІЧ знімках проглядається погано.

Волокниста текстура – волокна, нитки, смуги незначної товщини, але витягнуті в довжину на десятки і сотні кілометрів, з розмитими нечіткими краями (рис. 4.3). Така текстура характерна для хмар верхнього та середнього ярусів.

Особливий тип текстури властивий зображенню рельєфу суші – *дендритова текстура* (рис. 4.4). Вона характерна для зображення покритих снігом гір і рівнин з розгалуженою системою рік. Найбільше чітко дендритова текстура проглядається на знімках, отриманих у видимій ділянці спектра. На ІЧ зображеннях не завжди вдається простежити дендритовий вид текстури.



Рис. 4.3 – Волокниста текстура зображення (перисто подібна хмарність)



Рис. 4.4 – Дендритова текстура зображення (покриті снігом Альпи)

Мезоструктура та макроструктура зображення. Мезоструктура зображення – рисунок, обумовлений орієнтуванням і розташуванням на знімку пізнавальних деталей середніх розмірів, які можуть мати свою текстуру. Мезомасштабні утворення крім безпосередніх даних про

кількість, тип хмарності дають деяку інформацію про розподіл повітряних потоків і стратифікацію атмосфери.

Аналіз супутникових знімків дозволяє виділити наступні основні **типи мезоструктури**:

- хмарні лінії (поздовжні й поперечні),
- хмарні пасма (гряди),
- хмарні осередки (відкриті й закриті),
- хвилясті хмари,
- аномальні лінії хмарності,
- мезомасштабні вихрі (орографічні та конвективні),
- вторинні хмарні вихори.

Формування кожного із цих типів мезоструктури пов'язане з певними термодинамічними умовами та формами хмар.

Макроструктура характеризує хмарні системи синоптичного масштабу, окремі ділянки якої можуть мати мезомасштабні та мікромасштабні характеристики (мезоструктуру і текстуру). Макроструктура характеризує геометричні особливості більших ділянок зображення, створюваних сотнями елементів, розміри яких приблизно на два-три порядки більше роздільної здатності системи.

До макромасштабних хмарних систем відносяться:

- хмарні смуги;
- хмарні вихори (позатропічні та тропічні);
- хмарність внутрішньотропічної зони конвергенції;
- хмарність струминних плинів (течій).

Структурні характеристики хмарних систем дозволяють виявити загальну синоптичну обстановку, у якій спостерігаються ті або інші хмарні утворення.

Наведений комплекс основних характеристик лежить в основі розпізнавання хмар підстильної поверхні на космічних знімках. Але все-таки при наявності в розпорядженні фахівця цих хмарних характеристик завдання дешифрування залишається складним.

4.2 Особливості зображень на космічних знімках у різних ділянках спектра

Дешифрування космічних знімків, отриманих у різних діапазонах, відрізняються один від одного, як за формою, так і за змістом. Різний підхід до дешифрування знімків, у першу чергу, визначається відмінністю фізичних основ їх одержання.

Видима ділянка спектра. Основними об'єктами простежування із супутників у видимій ділянці спектра є хмари та відкриті ділянки земної поверхні на освітленій стороні Землі.

Можливість виявлення хмарності на фоні підстильної поверхні, полягає в їхній різній здатності відбивати падаючу на них пряму та розсіяну радіацію, завдяки чому на знімках, отриманих у видимій ділянці спектра, вони характеризуються різною яскравістю.

У свою чергу, яскравість поверхні об'єкта визначається інтенсивністю відбитого світлового потоку і залежить від його освітленості та коефіцієнта відбиття. Яскравість поверхні об'єктів, що мають однакові відбивні властивості, зростає при збільшенні освітленості і слабшає при її зменшенні. Природно, що яскравість об'єктів з різними відбивними властивостями різна при одній і тій же освітленості. Найважливішим фактором, що визначає освітленість поверхні об'єкта, є висота Сонця. Залежно від зміни висоти Сонця суттєво змінюється і освітленість поверхні. Серед інших не менш важливих факторів, що впливають на освітленість, необхідно вказати на прозорість атмосфери, на нахил поверхні, її шорсткість і ін.

Наявність в атмосфері аерозолів у вигляді крапель води, кристаликів льоду, пилу, димових часток і ін., помітно впливає на прозорість атмосфери. Зі збільшенням змісту аерозолів зменшується освітленість прямим і зростає освітленість розсіяним світлом. Оскільки атмосфера практично завжди замутилена, то при низькому положенні Сонця відбуваються істотні втрати в загальній освітленості горизонтальної поверхні.

Верхня межа хмар, як це показують результати літакового зондування, рідко буває однорідною по висоті. Тут можуть спостерігатися у вигляді величезних утворень потужні купчасті і купчасто-дощові хмари, що піднімаються, вертикальна протяжність яких декілька кілометрів, а горизонтальні розміри 10...15 км і більше. Звернені до Сонця похилі ділянки хмарного покриву і особливо бічні поверхні потужних купчастих і купчасто-дощових хмар на знімках, отриманих у видимій ділянці спектра, виглядають більш яскравими, ніж горизонтальні поверхні з такими ж відбивними властивостями.

Нерівність (шорсткість) верхньої межі суцільного хмарного покриву і відкритих ділянок поверхні приводить до створення великої кількості тіней. Кількість тіней визначається шорсткістю поверхні та кутом падіння сонячних променів. Чим більше шорсткість поверхні і менше кут падіння сонячних променів, тим більша кількість тіней може бути виявлена на знімку. У якості параметра, що характеризує здатність об'єкта відбивати падаючу на нього радіацію, використовується коефіцієнт відбиття, або альbedo. Відомо, що альbedo різне для різних довжин хвиль падаючої радіації.

Установлено, що відбивні властивості хмар тісно пов'язані з їхньою поглинальною здатністю і пропущенням прямої і розсіяної сонячної радіації, а також з відбивною здатністю підстильної поверхні, що

перебуває під хмарами. Альbedo хмар в основному визначається їхньою вертикальною потужністю, водністю, фазовим станом, висотою Сонця. У табл. 4.1 наведені середні значення альbedo різних хмар, виміряні по зображеннях, отриманих у видимій ділянці спектра.

Таблиця 4.1 – Середнє альbedo різних хмар, виміряне по зображеннях, отриманих у видимій ділянці спектра (хмарами закрито більше 80% виділеної площі)

Форма хмар	A, %
Купчасті гарної погоди над сушею	29
Перисто-шаруваті над сушею	32
Перисті над сушею	36
Шаруваті (тонкі)	42
Масиви шарувато-купчастих (усередині суцільного хмарного покриву над океаном)	60
Шаруваті (потужні)	64
Шарувато-купчасті (значні над сушею)	68
Купчасті і шарувато-купчасті (значні над сушею)	69
Перисто-шаруваті (потужні, з хмарністю та опадами, що пролягають нижче)	74
Купчасто-дощові (дрібні, вершини на висоті 6 км)	86
Купчасто-дощові (великі і потужні)	92

Таким чином, у відповідності із середніми значеннями альbedo (і зі зростаючими значеннями водності), по відбивних характеристиках хмари можна розташувати в наступному порядку:

- перисті,
- шаруваті,
- шарувато-купчасті та купчасті,
- купчасто-дощові.

На відміну від хмар об'єкти земної поверхні звичайно не відбивають помітної кількості радіації зі своїх внутрішніх областей у вигляді розсіяного світла.

Порівняльний аналіз альbedo хмар (табл. 4.1) та підстильної поверхні (табл. 4.2) показує, що розбіжності між ними коливаються в широких межах. Якщо альbedo хмар нижнього ярусу в середньому перевищує альbedo підстильної поверхні на 50...60 %, то значення цього параметра у хмар верхнього ярусу в середньому відрізняється від альbedo підстильної поверхні, порівняно мало, на 19...20%. Найменша відмінність (2...8%) між альbedo хмар верхнього ярусу підстильної поверхні, при більших висотах Сонця.

Таблиця 4.2 – Альbedo різних видів підстильної поверхні

Вид підстильної поверхні	A, %
Водна поверхня	2...6
Чорнозем	11
Деревна рослинність	10...18
Хвойний ліс	12
Трав'яний покрив	18...20
Забруднений вологий сніг	20...30
Поверхня глинистої пустелі	29...31
Пісок білий	34...40
Лід (залежно від згуртованості та засніженості)	30...70
Сніг, який щойно випав	80 (в умовах Арктики 96...98)
Снігова поверхня Антарктиди (середнє значення за рік)	83...84

У зв'язку із цим можуть виникати більші труднощі у виявленні хмар верхнього ярусу над відкритими ділянками поверхні Землі по знімках, отриманих у видимому діапазоні спектра. У тому випадку, коли в хмарному покриві спостерігаються просвіти або розриви, загальне альbedo видимого з ШСЗ хмарного покриву зменшується. Якщо хмарний покрив складається із дрібних хмарних елементів, розділених такими ж невеликими просвітами, то при загальному зниженні яскравості просвіти на знімку видимого діапазону не виявляються.

Інфрачервона ділянка спектра. Поглинання ІЧ радіації водяною парою, вуглекислим газом, озonom і іншими компонентами атмосфери відомо. Установлено, що найбільша прозорість атмосфери спостерігається у вікнах прозорості. На сучасних ШСЗ інфрачервона зйомка проводиться в довгохвильовому вікні прозорості 8...12 мкм. Відомо, що хмари (за винятком тонких Сі) непрозорі для ІЧ променів з довжиною хвилі 8...12 мкм, тому радіометром вимірюється енергія, випромінювана поверхнею Землі в районах, вільних від хмар, або верхньою межею хмарного покриву. Інтенсивність радіації, що надходить на супутник, вимірюється в межах елементарного кута зору супутника.

Отримані сигнали можуть перераховуватися в значення *еквівалентної температури* для кожного елемента відрізнєння або за допомогою особливих пристроїв перетворюватися на зображення випромінюючих поверхонь.

Інфрачервоні зображення виходять завдяки наявності *енергетичних*

контрастів між підстильною поверхнею та хмарами, тому ці знімки називаються тепловими. На таких теплових інфрачервоних знімках об'єкти, що мають більш високу температуру й, отже, що випромінюють більшу кількість променистої енергії, мають більш яскравий тон зображення, ніж об'єкти з меншою температурою.

Хмари в більшості випадків мають температуру нижче, ніж підстильна поверхня, і на стандартних теплових знімках хмарність мала б більш темний тон зображення, ніж підстильна поверхня. Для того щоб наблизити зорове сприйняття теплових знімків до знімків у видимій ділянці спектра у практиці використовують негативні відбитки інфрачервоних знімків. На цих знімках більш холодна хмарність має світлий тон зображення, а тепла підстильна поверхня, – темний тон зображення. Найбільш яскраві ділянки на ІЧ знімках відповідають хмарам, що досягли найбільших висот, що мають найбільш низьку температуру верхньої границі. Менш яскраві ділянки – відповідають хмарам з більш високою температурою верхньої границі або тонким хмарам верхнього та середнього ярусів і хмарним масивам із просвітами, випромінювання від яких змішується з випромінюванням від земної поверхні.

При потужних приземних інверсіях, що виникають уночі, у холодну пору року внаслідок сильного вихолоджування, верхня границя шаруватої хмарності може мати більш високу температуру, ніж підстильна поверхня. У цьому випадку хмари на ІЧ знімках виглядають темніше безхмарного простору, їх прийнято називати чорними шаруватими хмарами.

На ІЧ зображеннях поверхня суші в основному має темно-сірий тон, але внаслідок її температурної неоднорідності виражена різними півтонами. Так, низинні ділянки місцевості по тону зображення відрізняються від ділянок, розташованих більш високо над рівнем моря. Наявність великого теплового контрасту між сушею і водною поверхнею дозволяє на знімках розрізняти берегові лінії морів, обриси озер і великих рік, зміну тону водної поверхні залежно від зміни дня і ночі.

Мікрохвильова ділянка спектра. Можливість виявлення хмарності на НВЧ знімках, так само як і в ІЧ діапазоні, заснована на наявності контрастів, тобто різниці в потоках випромінювання різних об'єктів. Однак наявність цих контрастів на НВЧ зображеннях обумовлена не однією температурою випромінюючих поверхонь, як на ІЧ знімках, а сукупністю багатьох факторів, і зокрема коефіцієнта випромінювання.

У зв'язку з тим, що спектральний коефіцієнт випромінювання суші в 2,0...2,5 рази більше коефіцієнта випромінювання морської поверхні, на НВЧ знімках завжди чітко видна границя вода-суша, тобто обриси материків і островів. Суша характеризується яскраво-білим тоном зображення, морська вода (поверхня океану) – темно-сірим. Чітко на знімках видна і границя вода-лід, тому що коефіцієнт випромінювання льоду також значно більше коефіцієнта випромінювання води. У

мікрохвильовому діапазоні випромінювання підстильної поверхні поглинається хмарністю лише частково, а власне випромінювання хмар формується у всій їх товщі і залежить, крім середньої температури хмарного шару, від його фізичного стану, зокрема від змісту в ньому води і її хімічних властивостей. Цей факт має велике значення. Енергетичні контрасти між хмарами та сушею або негативні, або (у випадку потужної хмарності та опадів) близькі до нуля, а між морською поверхнею і хмарами завжди позитивні. Тому хмарні утворення виявляються невидимими на тлі „гарячої” суші і відмінно проглядаються над „холодною” морською поверхнею (при наявності певних енергетичних контрастів).

Оскільки кристалічні хмари прозорі для мікрохвильового випромінювання підстильної поверхні, і самі не випромінюють електромагнітну енергію в цьому діапазоні, то на НВЧ знімках вони не видні, яким би щільним і потужним не був їхній шар. Інтенсивність випромінювання атмосфери і хмар, від якої залежить тон їх зображення на НВЧ знімках, на довжині хвилі 0,8 см пропорційна кількості водяної пари та вмісту води в атмосфері. Зі збільшенням вмісту води в атмосфері росте інтенсивність випромінювання. Тому, чим більше вертикальна потужність рідинної частини хмари, тим світліше тон його зображення на НВЧ знімку. Самий яскравий тон зображення (за винятком материків) мають хмари, з яких випадають помірні та сильні опади. Ріст радіояскравих температур зі збільшенням вмісту води в атмосфері відбувається лише до певної межі, після якої, як би не збільшувався зміст води в атмосфері, зростання радіояскравих температур припиняється. На довжині хвилі 0,8 см такою межею є значення радіояскравої температури 255...260 К, яка спостерігається при інтенсивності випадання опадів близько 10 мм/год.

4.3 Етапи і зміст обробки космічних знімків

У задачах вивчення Землі з космосу істотна роль приділяється багатозональним космічним зйомкам. Великий обсяг інформації, який у цьому випадку надходить з ШСЗ, приводить до необхідності створення і розвитку раціональних методів і засобів її обробки. По сучасних представленнях така обробка повинна полягати, принаймні, із **чотирьох етапів**:

- службової обробки,
- просторової прив'язки,
- радіаційної корекції,
- тематичної інтерпретації.

Службова обробка повинна полягати у введенні первинної інформації в ЕОМ, її анотуванні та проведенні апаратурних корекцій. Вихідними даними для останніх служать матеріали геометричних і радіометричних калібрувань знімальної апаратури.

У результаті **просторової прив'язки** повинні бути отримані трансформовані в проекцію карти зображення із вдрукованою в них координатною сіткою. Для вивчення динаміки природних утворень необхідні матеріали повторних зйомок з високою точністю просторової прив'язки (в порядку декількох елементів відрізнення). Одержати таку точність можливо лише на основі спільного використання апріорних даних про траєкторію і орієнтацію ШСЗ і апостеріорних даних про геодезичні координати контурних точок знімків.

Радіаційна корекція полягає в трансформації на борті ШСЗ потоку випромінювання до деяких стандартних умов вимірів (наприклад, до однакових умов освітленості на нижній границі атмосфери).

Метою **тематичної інтерпретації** є розпізнавання на зображеннях природних об'єктів або явищ. Тематична обробка у свою чергу може містити в собі розв'язання задач конструювання нових зображень і їх інтерпретацію. При конструюванні нових зображень доцільні такі операції, як перетворення Фур'є, підкреслення контурів, складання зображень, що є комбінацією вихідних багатозональних зображень, і т.п. Основна мета таких операцій – підвищення образотворчих властивостей знімків.

Зазначені етапи обробки поєднують по змісту робіт в **2 групи**:

1) **попередня обробка** знімків, що полягає в корекції та покращенні супутникових зображень, що включає в себе:

- геометричну корекцію супутникових зображень,
- радіометричне калібрування знімків,
- радіометричну корекцію впливу атмосфери,
- відновлення пропущених пікселів,
- покращення зображення шляхом зміни контрасту,
- фільтрацію та ін.

Слід зазначити, що деякі методи покращення зображень (фільтрація, зміна контрасту) мають на увазі зміну спектральних характеристик знімка, тому після їхнього застосування не можна застосовувати методи тематичної обробки, які засновані на аналізі значень спектральної яскравості пікселів (класифікації, арифметичні перетворення каналів і ін.).

2) **тематична обробка** знімків, що включає в себе:

- колірні перетворення,
- створення індексних зображень,
- аналіз головних компонентів,
- метод спектрального поділу,
- методи класифікації та ін.

Необхідність **попередньої обробки** визначається особливостями дистанційного зондування.

При проведенні **просторової прив'язки** потрібно виконати операцію геометричної корекції.

Геометрична корекція – це усунення на зображенні геометричних викривлень (орторектифікація) і, властиво, географічна прив'язка. Причин геометричних викривлень існує декілька і діють вони спільно. Для різних типів космічних знімків комбінація цих причин різна.

1) Кривизна поверхні Землі.

- геометричні викривлення знімків, спричинені кривизною поверхні Землі, виходять у результаті того, що точки сканованої місцевості не лежать в одній площині і спостереження ведеться не в надирі, а під кутом до поверхні Землі (рис. 4.5). Тому при віддаленні від центральної лінії сканування (де зйомка ведеться в надирі) викривлення форми та розміру об'єктів збільшується. Це призводить до викривлення форми об'єктів. Цим типом викривлення можна знехтувати, якщо кут огляду сканера невеликий,
- викривлення масштабу. Для знімків, зроблених 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 області знімка, а другий з бічної, то піксель із бічної області буде містити більшу площу Землі, хоча кутовий розмір їх однаковий. Для знімків, отриманих за допомогою ПЗЗ камери (супутники SPOT, IRS, Ikonos, датчик Aster (VNIR, SVIR)) масштаб при віддаленні від центральної лінії знімка не змінюється.



Рис. 4.5 – Ілюстрація кривизни поверхні Землі

2) Нерівності рельєфу.

Нерівності рельєфу викликають ті ж викривлення, що й кривизна поверхні землі, але задача усунення їх складніше через те, що форми рельєфу складніші, ніж форма Землі, яка близька до сфери. Оскільки космічні знімки роблять із великої висоти, то вплив форм рельєфу незначний, тому даний тип викривлень ураховують лише для гірських областей (рис. 4.6).

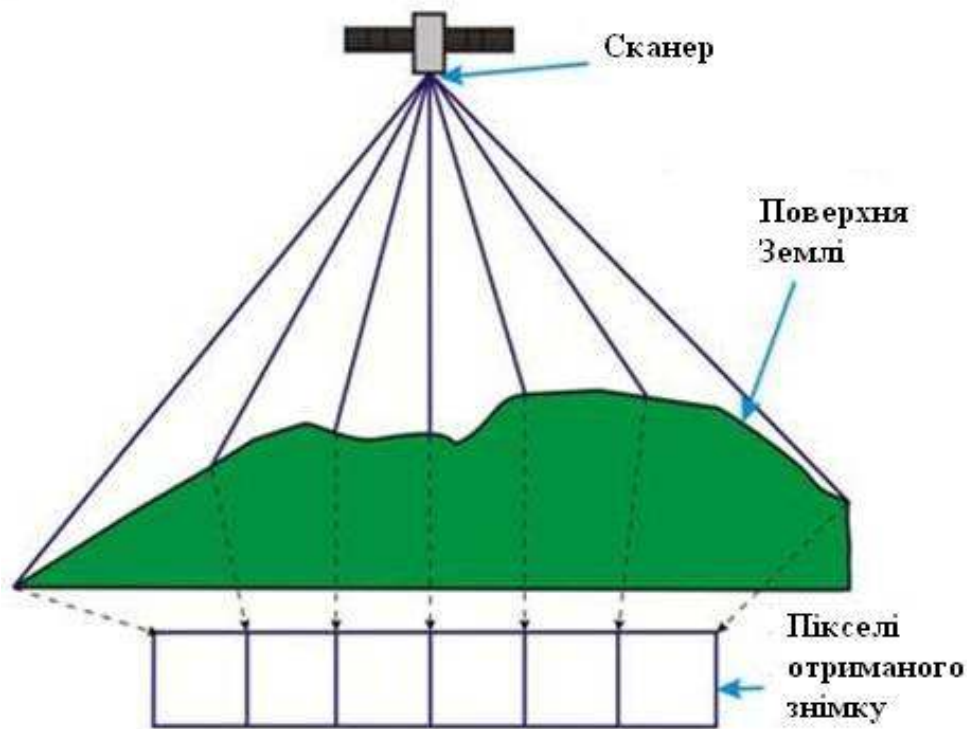


Рис. 4.6 – Ілюстрація нерівностей рельєфу

3) Обертання Землі.

Оскільки сканування Землі з космосу відбувається не миттєво, як при фотозйомці, то за час сканування сцени обертання Землі викликає зміну умов зйомки (за 1 хвилину Земля повертається на $0,25^\circ$).

4) Рух космічного апарата в процесі формування зображення.

На якість і властивості знімків впливає форма та висота орбіти супутника. Наприклад, кругова орбіта забезпечує однакову висоту зйомки земної поверхні, а, отже, для однієї й тієї ж апаратури – однакове охоплення і відрізнєння знімків.

Радіометричне калібрування знімків. Знімки, спочатку одержувані із супутників, записані у вигляді так званих „сирих значень” яскравості DN (Digital Number) або, як говорять, у вигляді RAW файлів (raw – сирий). Дані в такому форматі не можна адекватно зіставляти з даними інших зйомок. Завдання радіометричного калібрування полягає в перекладі цих

значень у фізичні одиниці. Формула для калібрування багатозональних знімків в оптичному діапазоні наступна:

$$B^*_\lambda = K_\lambda D_N + C_\lambda \quad (4.1)$$

де B^*_λ – енергетична яскравість для спектральної зони λ ; D_N – „сирі” значення яскравості; K_λ – калібрувальний коефіцієнт; C_λ – калібрувальна константа, відповідна до мінімальної величини реєструємої яскравості.

Радіометрична корекція впливу атмосфери на знімок. При проходженні через атмосферу електромагнітні хвилі поглинаються та розсіюються. Причиною поглинання і розсіювання є озон, водяна пара, вуглекислий газ, кисень, метан, пил, дим. Хмарність також є перешкодою при зйомці в оптичному діапазоні (рис. 4.7).



Рис. 4.7 – Заважальні атмосферні фактори

Поглинання, розсіювання і хмарність викликають викривлення значень яскравості пікселів на знімках. Потрібна атмосферна корекція.

Способи атмосферної корекції.

1. Хмари та тумани добре видні на фоні води, тому що в червоному та ІЧ ділянках спектра поверхня води по своїх оптичних характеристиках близька до абсолютно чорного тіла. Тому вміст в атмосфері водяної пари і аерозолів (диму) можна оцінити по знімках, що включають ділянки морів і океанів.
2. Існують математичні методи побудови моделей стану атмосфери з урахуванням типів розсіювання в атмосфері, пори року, метеорологічних даних. Для уточнення таких моделей використовують наземний вимір відбивної здатності об'єктів під час польоту супутника.

Відновлення пропущених 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 погрешністю (рис. 4.8).

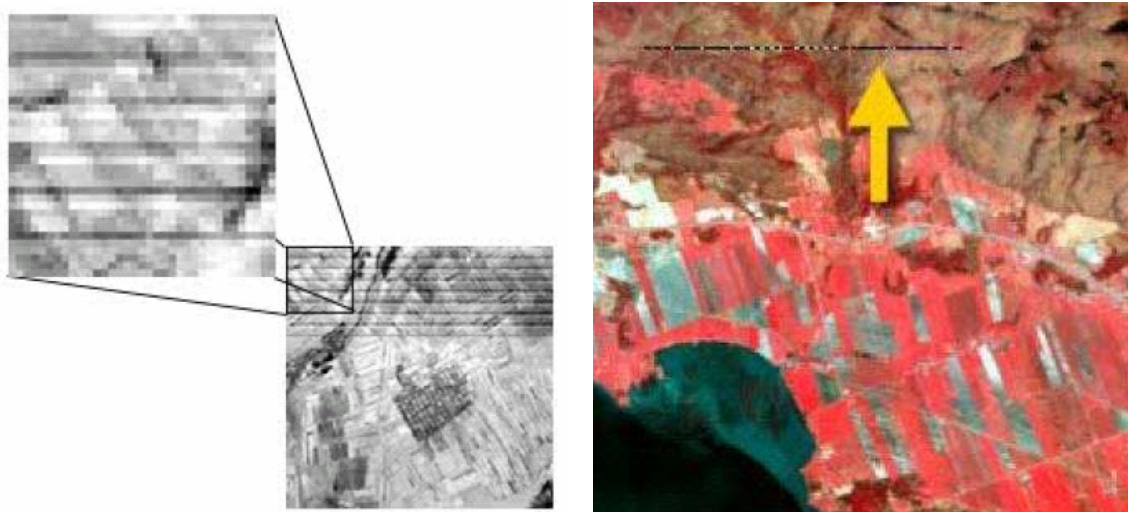


Рис. 4.8 – Відновлення пропущених пікселів

При обробці знімків часто **покращують зображення шляхом зміни контрасту**.

Контраст зображення – це різниця між максимальним і мінімальним значеннями яскравості.

Слабкий контраст – найпоширеніший дефект зображень (рис. 4.9).

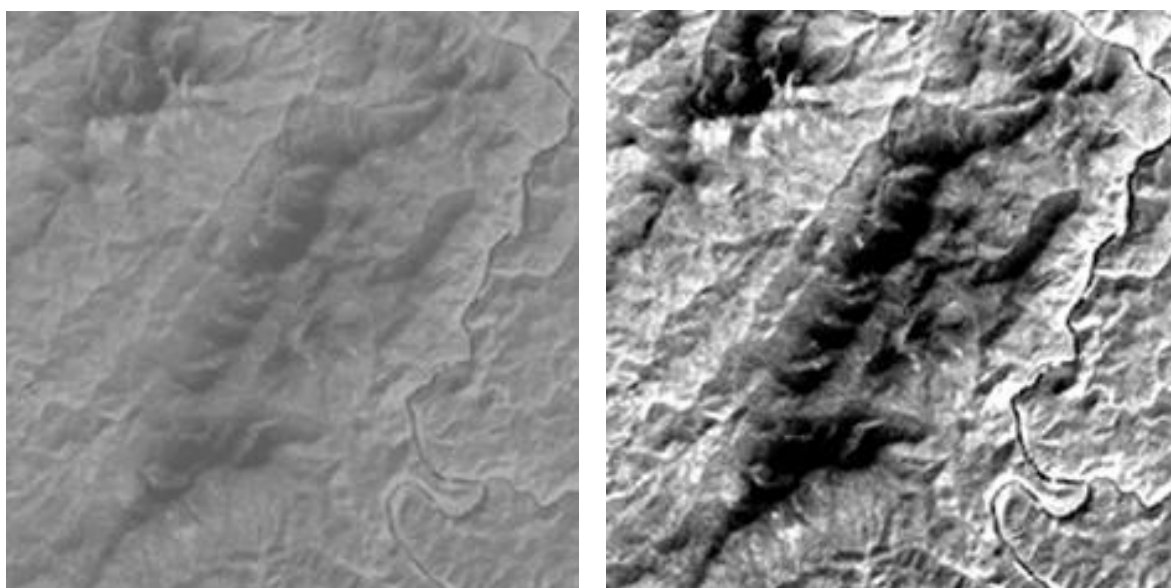


Рис. 4.9 – Неконтрастне (ліворуч) і контрастне (праворуч) зображення

Операція підвищення контрастності знімка може бути використана при візуальному дешифруванні знімків (наприклад, щоб підкреслити границі об'єктів).

Існує кілька методів підвищення контрасту за рахунок цифрової обробки:

1) Лінійне розтягування гістограми.

Усім значенням яскравості привласнюються нові значення з метою охоплення всього можливого інтервалу зміни яскравості (0, 255). Вихідний знімок: діапазон значень яскравості від 126 до 165, середнє = 140 (рис. 4.10).

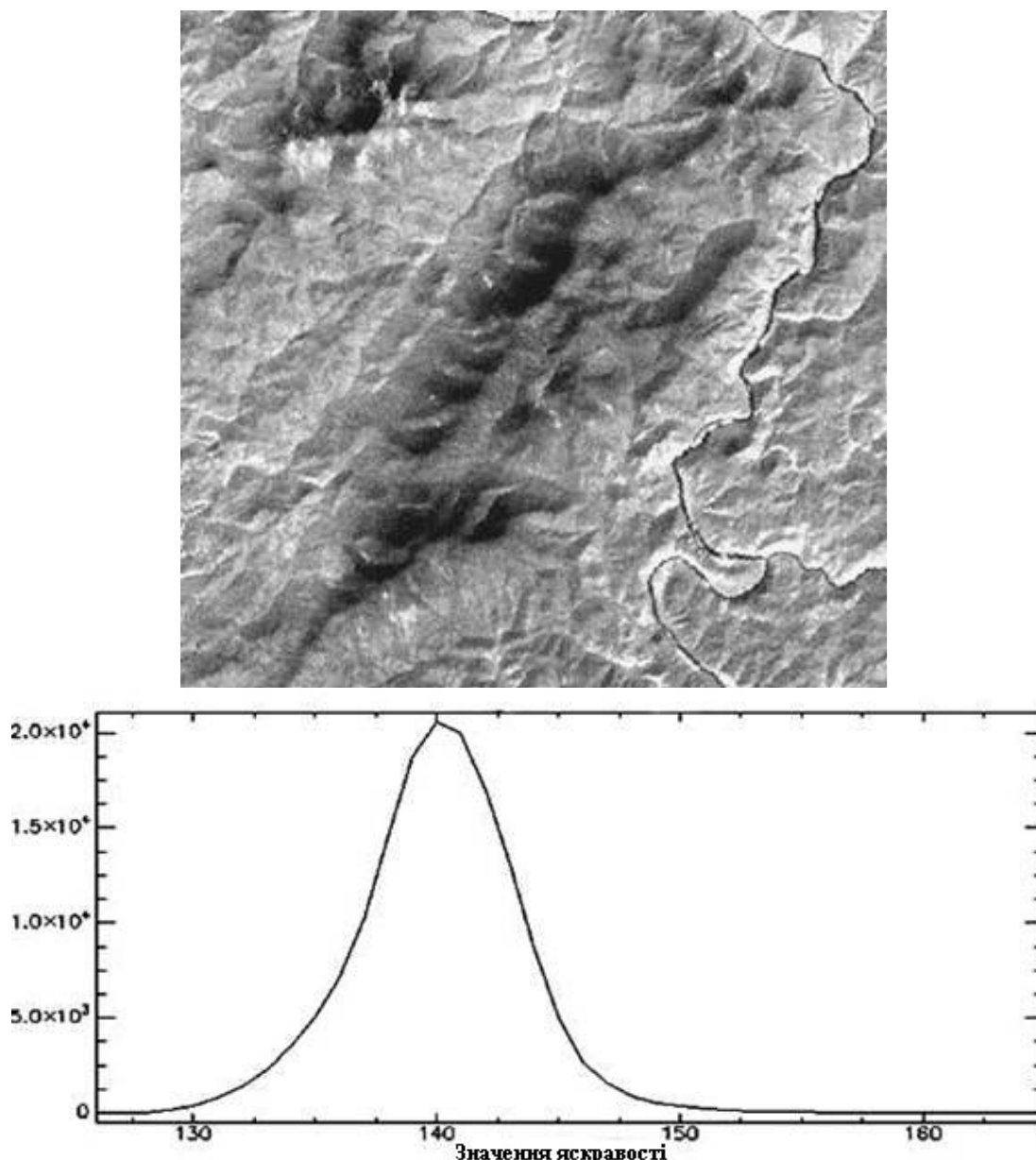


Рис. 4.10 – Вихідний знімок для перетворення і його гістограма

Знімок після лінійного розтягування гистограми: діапазон значень яскравості від 0 до 255, середнє = 136,7 (рис. 4.11).

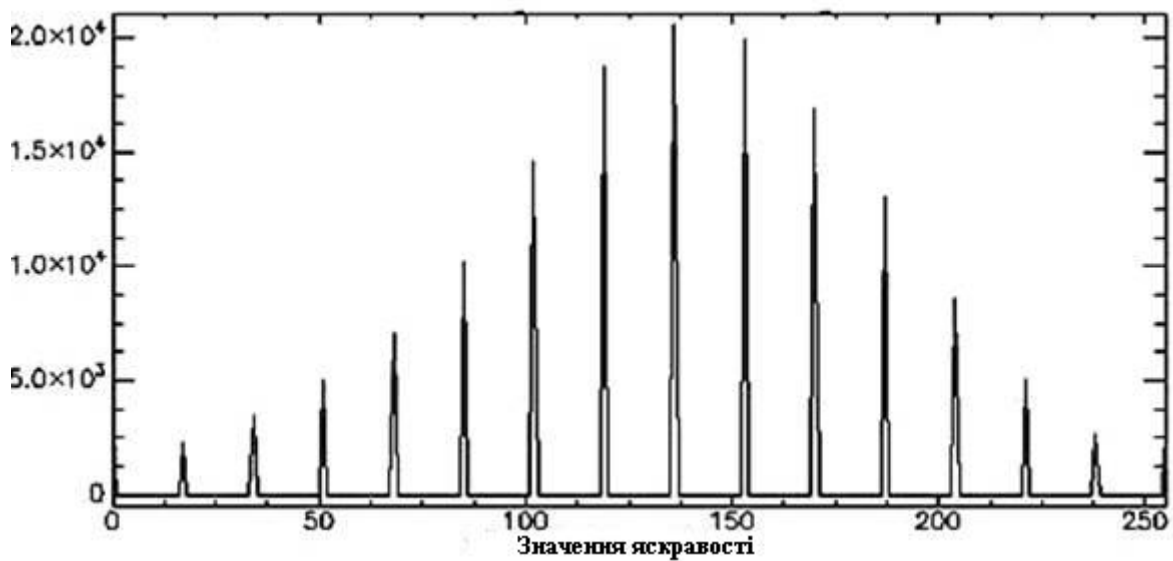
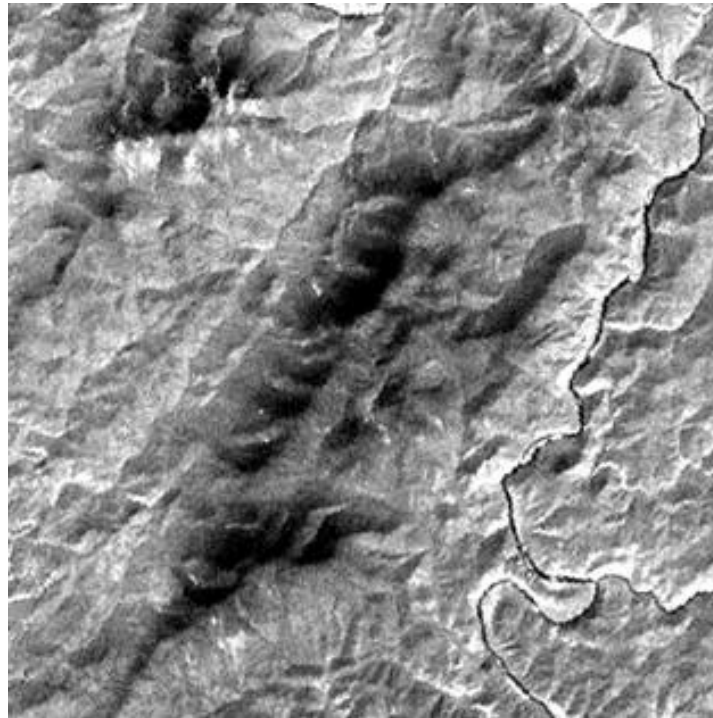


Рис. 4.11 – Знімок після лінійного розтягування гистограми і його гистограма

2) Нормалізація гистограми.

На весь можливий інтервал зміни яскравості розтягується не вся гистограма, а її найбільш інтенсивна ділянка.

Знімок після нормалізації гистограми: діапазон значень яскравості від 0 до 255, середнє = 121,5. Причому розтягнута середня, найбільш інформативна частина гистограми (рис. 4.12).

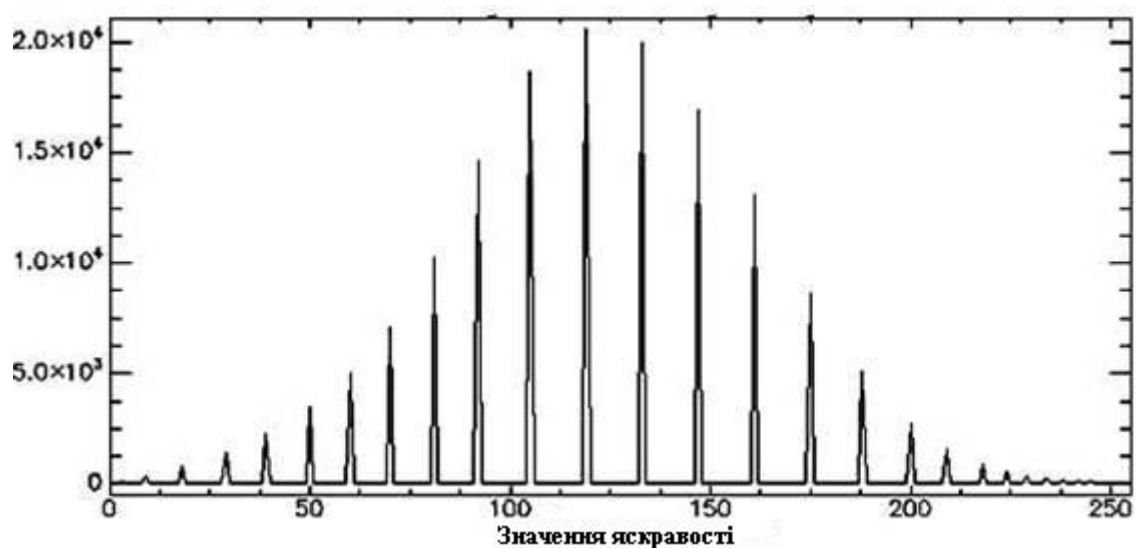
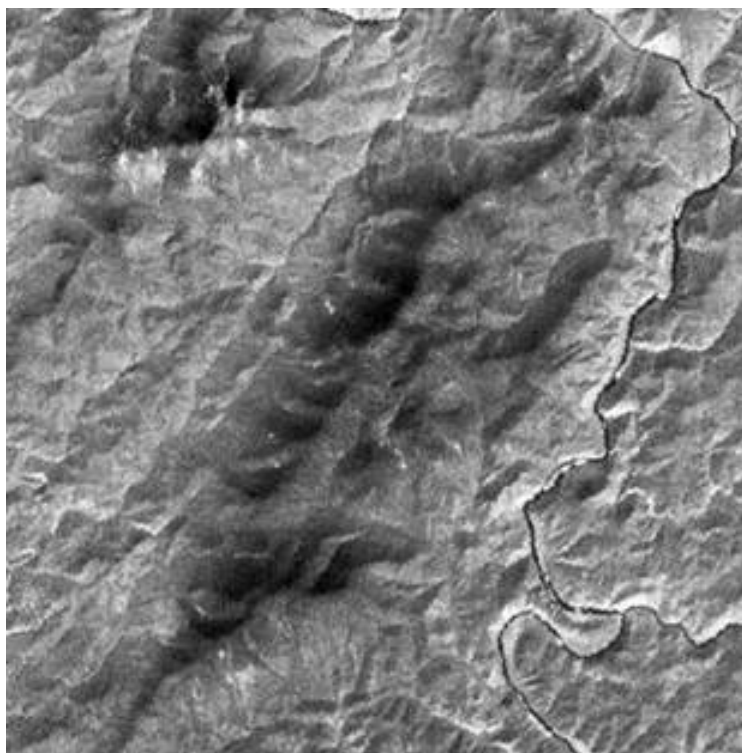


Рис. 4.12 – Знімок після нормалізації гистограми і його гистограма

3) Вирівнювання гистограми (лінеаризація, еквалізація).

У процесі вирівнювання відбувається зміна значень яскравості пікселів таким чином, щоб для кожного рівня яскравості було однакове або близька кількість пікселів.

Знімок після вирівнювання гистограми: діапазон значень яскравості від 0 до 255, середнє = 115,9 (рис. 4.13).

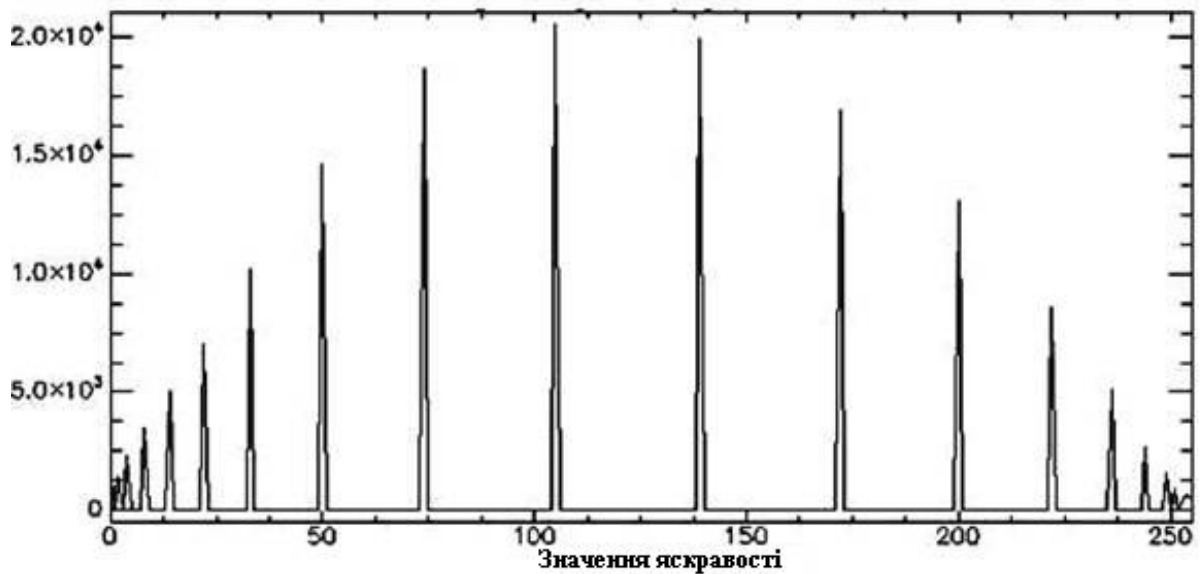


Рис. 4.13 – Знімок після вирівнювання гістограми і його гістограма

При *покращенні зображень* часто застосовують *методи фільтрації*. Фільтрація – це перетворення, яке дозволяє підсилити відтворення тих або інших об'єктів, придушити небажану вуаль на зображенні, усунути інші випадкові перешкоди (шум).

Один з найпростіших способів фільтрації – перетворення в ковзному вікні.

При такому перетворенні перераховуються значення яскравості всіх

пікселів зображення. Перерахування відбувається для кожного пікселя в такий спосіб: якщо даний піксель є центральним у вікні, яке „рухається” по знімкові, йому дається нове значення, яке є функцією від значень оточуючих його у вікні пікселів. Розмір вікна може бути, наприклад, 3×3 або 5×5 пікселів. Щораз вікно зміщується на 1 піксель і рухається доти, поки не пройде весь знімок. Для всіх пікселів вікна встановлюються вагові коефіцієнти, виходячи із мети дешифрування.

Якщо вагові коефіцієнти всіх пікселів у вікні рівні, зображення буде згладжено (рис. 4.14).

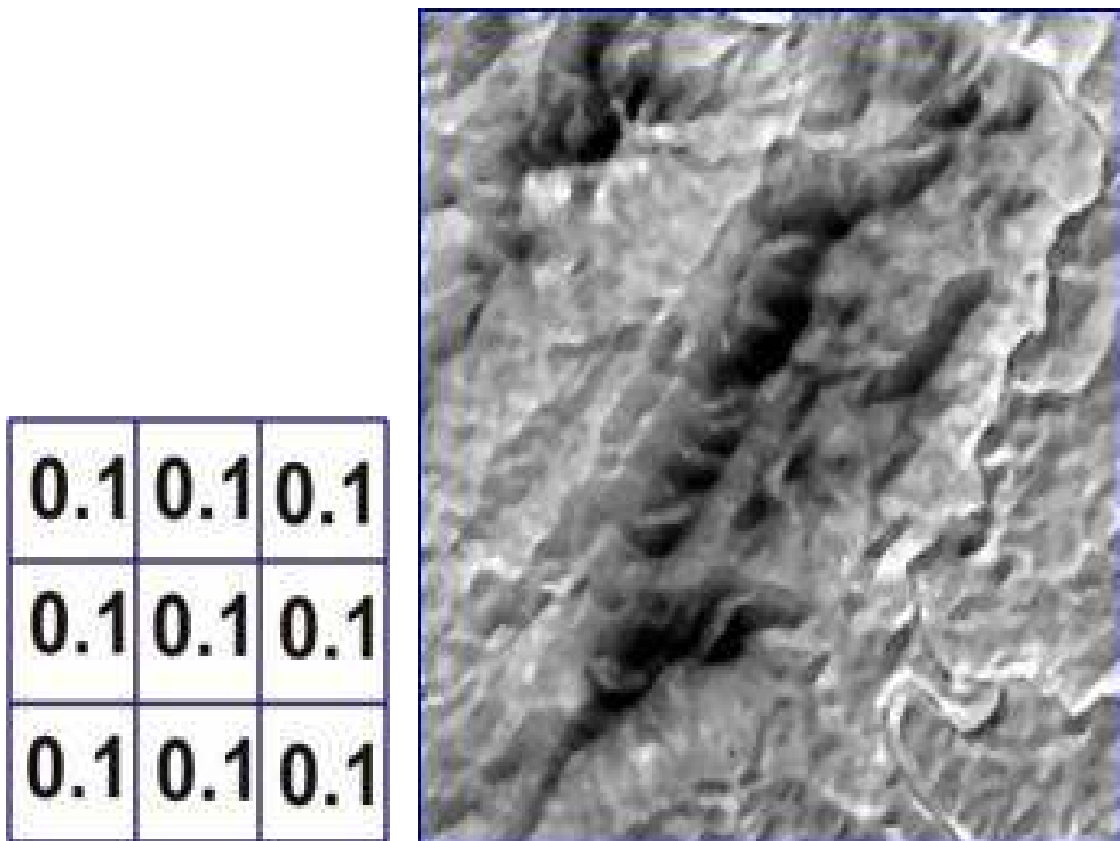


Рис. 4.14 – Згладжений знімок

Якщо ваговий коефіцієнт центрального пікселя у вікні значно більший від інших, то зображення стане більш різким (рис. 4.15).

Якщо вагові коефіцієнти вертикально розташованих пікселів у вікні будуть значно більші від інших, то на зображенні виділяться вертикальні лінії (рис. 4.16).

-1	-1	-1
-1	3	-1
-1	-1	-1

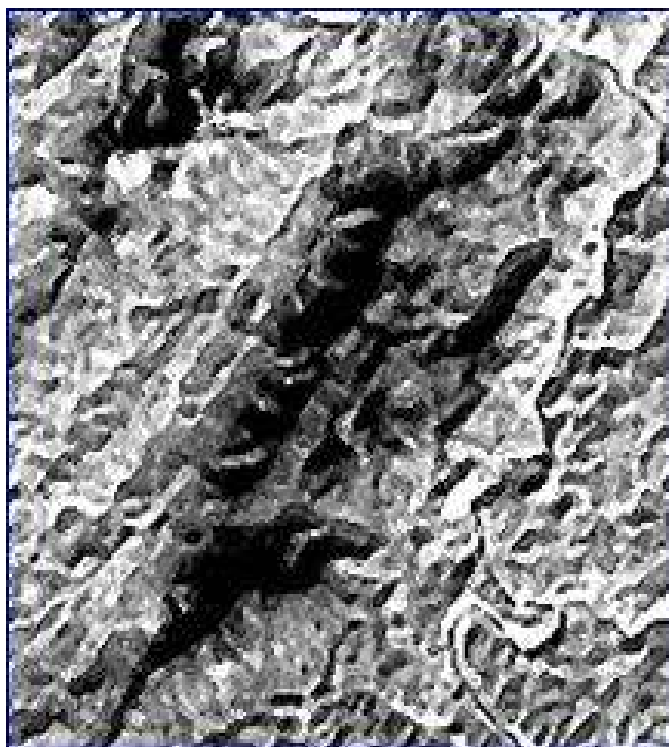


Рис. 4.15 – Підвищення різкості знімка

-1	3	-1
-1	3	-1
-1	3	-1

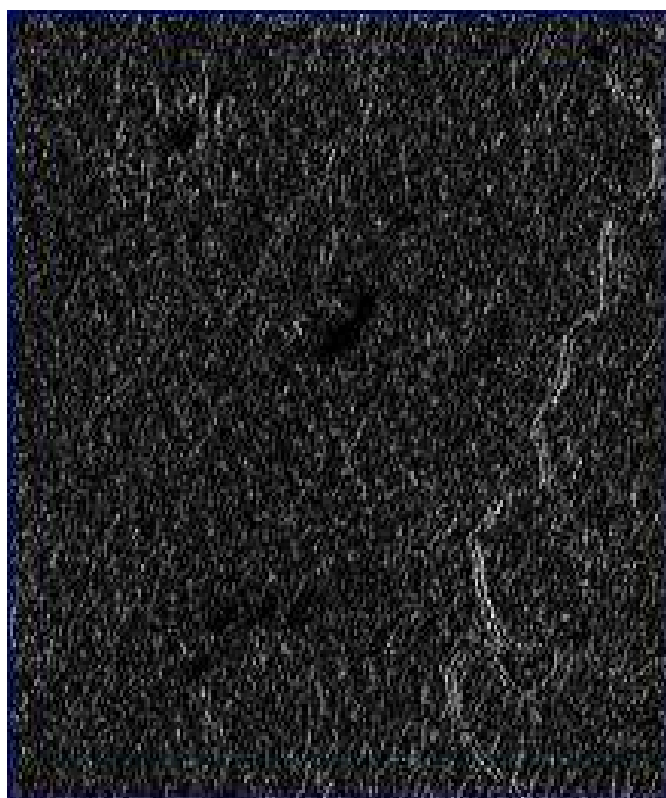


Рис. 4.16 – Виділення ліній на знімку

Методи інтерпретації зображень прийнято підрозділяти на:

- візуальні,
- візуально-інструментальні,
- машинні.

У кожному разі розробка методів інтерпретації починається з вибору і вивчення *дешифрувальних ознак* природних утворень. Такими ознаками можуть бути: обмірювані радіаційні характеристики (або їх функції), рисунок зображення, непрямі ознаки, що впливають із ландшафтних особливостей зображеної території. Вибір дешифрувальних ознак здійснюється на основі відбивних характеристик систем природних утворень і умов трансформації цих характеристик атмосферою.

Безпосередньо інтерпретація містить у собі так звану *задачу ухвалення рішення*. При візуальному дешифруванні ухвалення рішення ґрунтується головним чином на знаннях і досвіді фахівця. При інтерпретації за допомогою ЕОМ звичайно використовуються критерії, що впливають із теорії оптимальних статистичних рішень. Для визначення параметрів (метеорологічних, екологічних, біометричних показників, швидкості стоку і т.п.) результати дешифрування повинні бути піддані спеціальній обробці.

Успіх інтерпретації багатозональних знімків суттєво залежить від оптимального вибору спектральних діапазонів зйомки відповідно до відбивних властивостей шуканих природних об'єктів і явищ. У той же час вибір цих діапазонів повинен базуватися на розв'язанні задач інтерпретації.

Дешифруванням називається процес розпізнавання хмарності, снігу, льоду і об'єктів земної поверхні по космічних знімках. При дешифруванні необхідно, по можливості, одержати оптимальне число різноманітних характеристик, що дозволяють дати правильну якісну та кількісну оцінки об'єкта, зображеного на знімку.

Тематична обробка космічних знімків – це *процес дешифрування або розпізнавання об'єктів і явищ* на космічних знімках.

Велику роль при інтерпретації зображень відіграє **колір**.

Кольорове зображення на моніторі комп'ютера виходить шляхом додавання трьох основних кольорів. За основні прийняті кольори, відповідні до монохроматичних випромінювань із довжиною хвилі 0,7 мкм (червоний – R); 0,5461 мкм (зелений – G); 0,4358 (синій – B). Таке представлення кольору називають колірною моделлю RGB (рис. 4.17).

У файлі кольорового зображення для кожного пікселя записано три числа, які означають інтенсивності трьох основних кольорів, діапазон значень від 0 до 255.

Практично будь-який колір, видимий людиною, може бути представлений як сума трьох основних кольорів.

Якщо значення яскравості $R=255$, $G=0$, $B=0$, то піксель буде пофарбований у червоний колір.

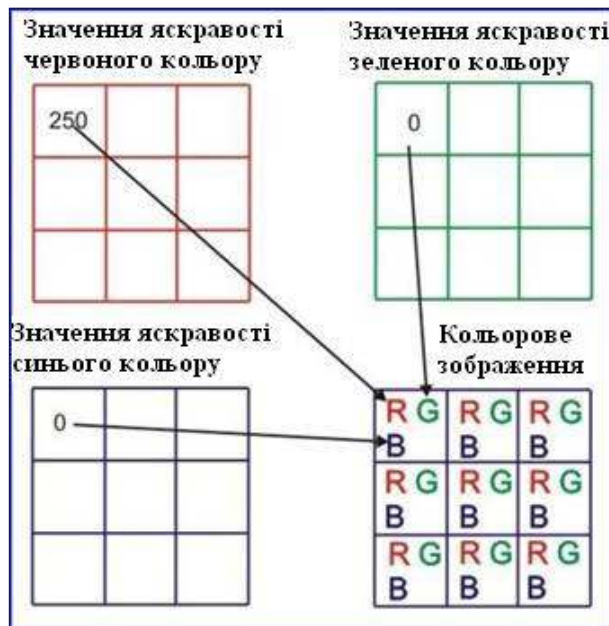


Рис. 4.17 – Колірна модель RGB

Якщо значення яскравості рівні між собою $R=G=B$, піксель буде пофарбований у сірий колір.

Якщо значення яскравості R, G, B не рівні між собою, то залежно від значень яскравості R, G, B піксель буде пофарбований у певний колір (рис. 4.18).

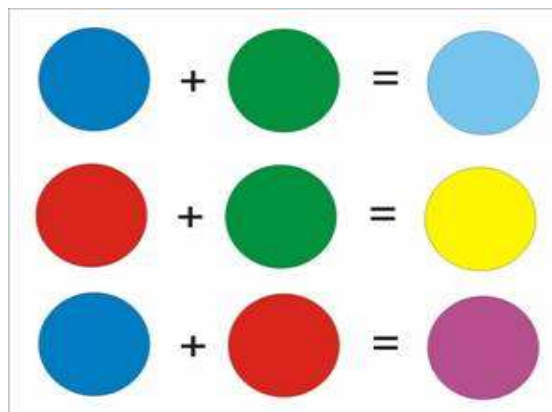


Рис. 4.18 – Додавання кольорів у колірній моделі RGB

Застосовуються й інші методи представлення кольорових зображень.

Метод колірних перетворень. Якщо вивести на екран дисплея зображення одного каналу багатоспектрального знімка, то воно буде пофарбовано в сірі тони (напівтонове зображення). Щоб одержати кольорове зображення потрібно скласти разом три канали багатоспектрального знімка, один з яких буде червоний (R), інший зелений (G), третій синій (B) (рис. 4.19).

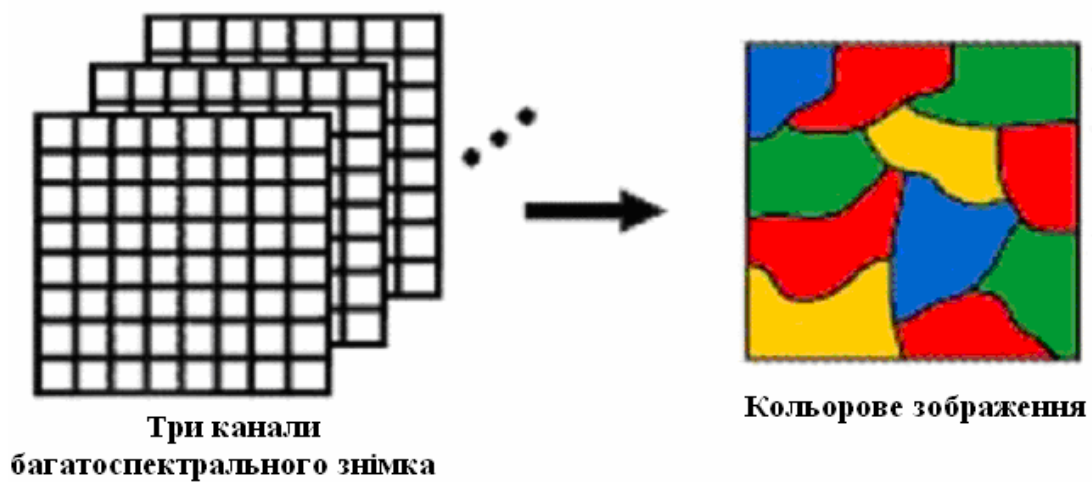


Рис. 4.19 – Кольорове зображення

Часто фарбують зображення в натуральні та неправильні кольори або псевдокольори. Якщо в канали R, G, B зображення підставлені R, G, B канали знімка, то зображення представлено в натуральних кольорах (рис. 4.20).

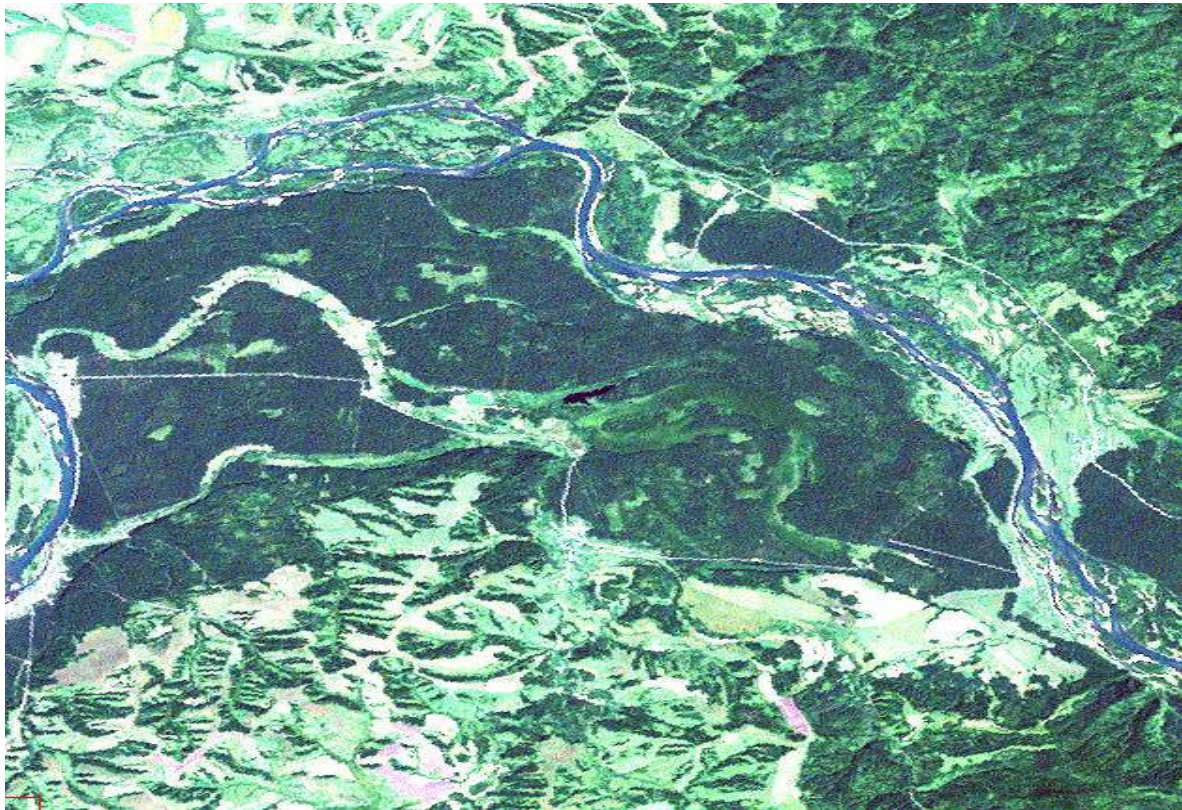


Рис. 4.20 – Приклад фарбування зображення в натуральні кольори
(коментарі в таблиці нижче)

Таблиця 4.3 – Характеристика зображення (рис.4.20)

Канали зображення	Спектральні канали знімка	Колір води на зображенні	Колір рослинності на зображенні	Колір ґрунту на зображенні
R	Червоний	Синій	Зелений	Коричнево-сірий
G	Зелений			
B	Синій			

Якщо в канали R, G, B зображення підставлені інші канали знімка, то зображення представлено в неправильних або псевдокольорах (рис. 4.21). Механізм добору кольору зображення наступний. Якщо в канал зображення R підставити канал знімка, у якому значення яскравості пікселів високі, а в канали G і B канали з низькими значеннями яскравості, то зображення буде пофарбовано переважно в червоні тони і так далі.

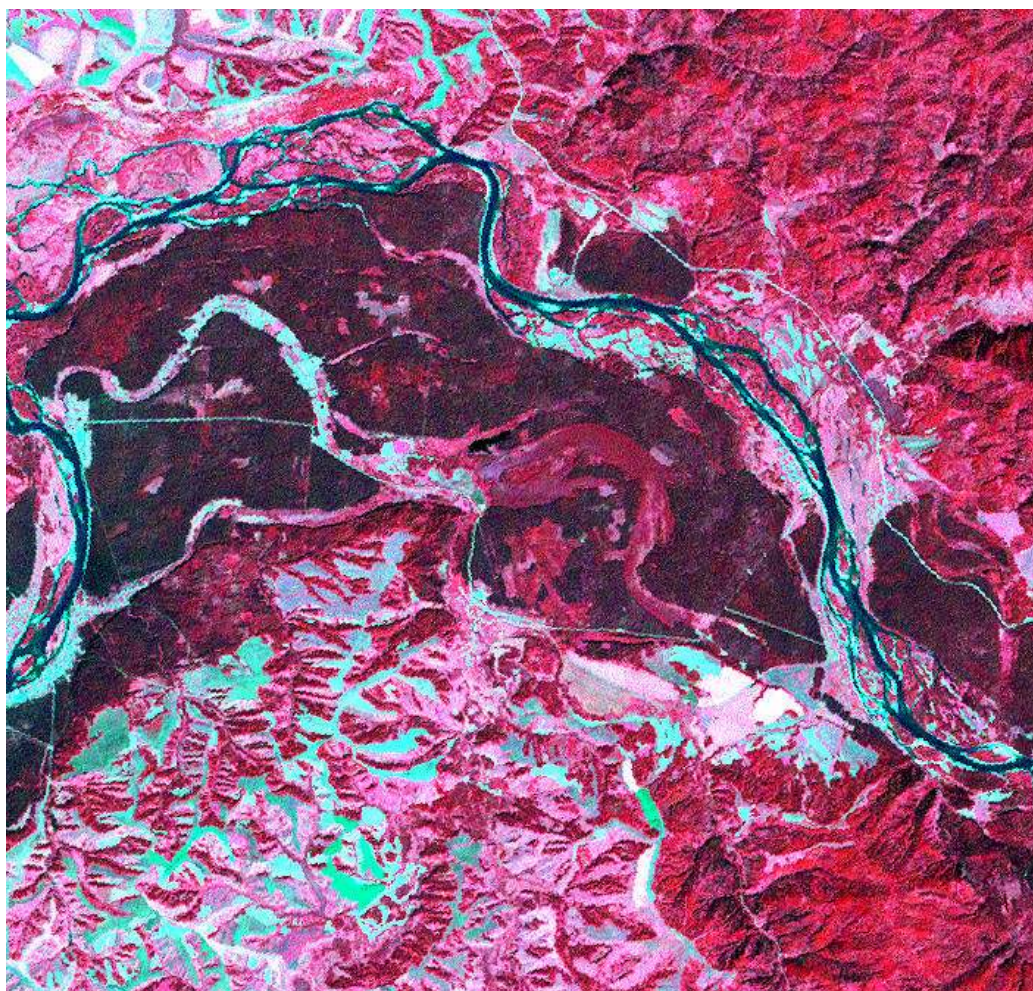


Рис. 4.21 – Приклад фарбування зображення в неправильні (псевдо) кольори (коментарі в таблиці нижче)

Таблиця 4.4 – Характеристика зображення (рис.4.21)

Канали зображення	Спектральні канали знімка	Колір води на зображенні	Колір рослинності на зображенні	Колір ґрунту на зображенні
R	Близький ІЧ	Чорний	Червоний	Сіро-блакитний
G	Червоний			
B	Зелений			

Сутність об'єктів доцільно визначати на зображеннях у натуральних кольорах, а розділяти та оконтурювати об'єкти зручніше на зображеннях у псевдокольорах. Правильно підібрана шкала дозволяє операторові візуально виділяти об'єкти, що мало відрізняються по яскравості на напівтоновому зображенні.

Індексні зображення. Для одержання індексного зображення, значення яскравості кожного пікселя обчислюється шляхом застосування арифметичних операцій над значеннями яскравості цього пікселя з різних каналів знімка. При вивченні об'єктів по багатозональних знімках часто важливі не абсолютні значення, а характерні співвідношення між значеннями яскравості об'єкта в різних спектральних зонах. На таких зображеннях більш яскраво й контрастно виділяються шукані об'єкти в порівнянні з вихідним знімком (рис. 4.22).

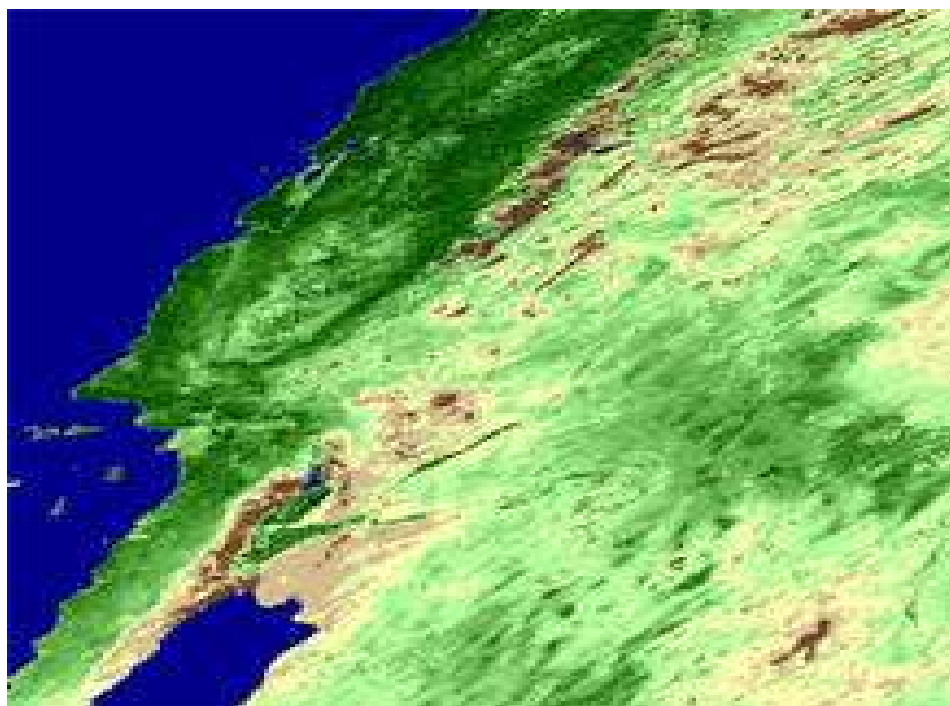


Рис. 4.22 – Приклад індексного фарбування зображення (вегетаційний індекс)

Як приклад приведемо кілька індексів, їх призначення і порядок розрахунків:

- індекс вмісту оксиду заліза, призначений для виявлення вмісту окислів заліза, являє собою відношення значень яскравості в червоному (Ч) каналі до значень яскравості в синьому каналі (С) – $Ч/С$;
- індекс вмісту глинистих мінералів, призначений для виявлення вмісту глинистих мінералів, являє собою відношення значень яскравості в межах середнього інфрачервоного каналу (СІЧ) – $СІЧ1/СІЧ2$. СІЧ1 це діапазон від 1,55 до 1,75 мкм, СІЧ2 – від 2,08 до 2,35 мкм;
- індекс вмісту залізистих мінералів, призначений для виявлення вмісту залізистих мінералів, являє собою відношення значення яскравості в середньому інфрачервоному (СІЧ1 – див. вище) каналі до значення яскравості в близькому інфрачервоному каналі (БІЧ) – $СІЧ1/БІЧ$;
- індекс червонокольоровості (RI), призначений для виявлення вмісту оксиду заліза в ґрунті, заснований на відмінності відбивної здатності червоноколірних мінералів у червоному (Ч) і зеленому (З) діапазонах – $RI = Ч - З/Ч + З$;
- водний індекс (WI), застосовується для визначення вмісту води в рослинності по гіперспектральних знімках – $WI = 0,90\text{мкм}/0,97\text{мкм}$;
- нормалізований диференціальний індекс снігу (NDSI), використовується для виділення територій, покритих снігом (для снігу $NDSI > 0,4$), NDSI – це відносна величина, яка характеризується відмінністю відбивної здатності снігу в червоному (Ч) і короткохвильовому інфрачервоному (КІЧ) діапазонах – $NDSI = (Ч - КІЧ)/(Ч + КІЧ)$;
- нормалізований диференціальний вегетаційний індекс (NDVI), показує наявність і стан рослинності. Хлорофіл листів рослин відбиває випромінювання в близькому інфрачервоному (БІЧ) діапазоні електромагнітного спектра й поглинає в червоному (Ч). Відношення значень яскравості в цих двох каналах дозволяє чітко відокремлювати і аналізувати рослинні від інших природних об'єктів – $NDVI = (БІЧ - Ч)/(БІЧ + Ч)$. Значення NDVI варіюють у межах від -1 до 1:
 - густа рослинність – 0,7;
 - виряджена рослинність – 0,5;
 - відкритий ґрунт – 0,025;
 - хмари – 0;
 - сніг і лід – -0,05;
 - вода – -0,25;

штучні матеріали (бетон, асфальт) – -0,5.

Існують різні способи *класифікації*. Розглянемо один зі способів, а саме, метод аналізу головних компонентів.

Аналіз головних компонентів – це метод аналізу багатоспектральних корельованих даних. Поняття корельовані дані означає, що при зростанні значення яскравості пікселів в одному спектральному каналі зростають значення яскравості і в інших спектральних каналах.

На рис. 4.23 показаний приклад двовимірного простору спектральних ознак, при зростанні значення в першому каналі зростає значення в другому, це означає високу кореляцію між цими каналами.

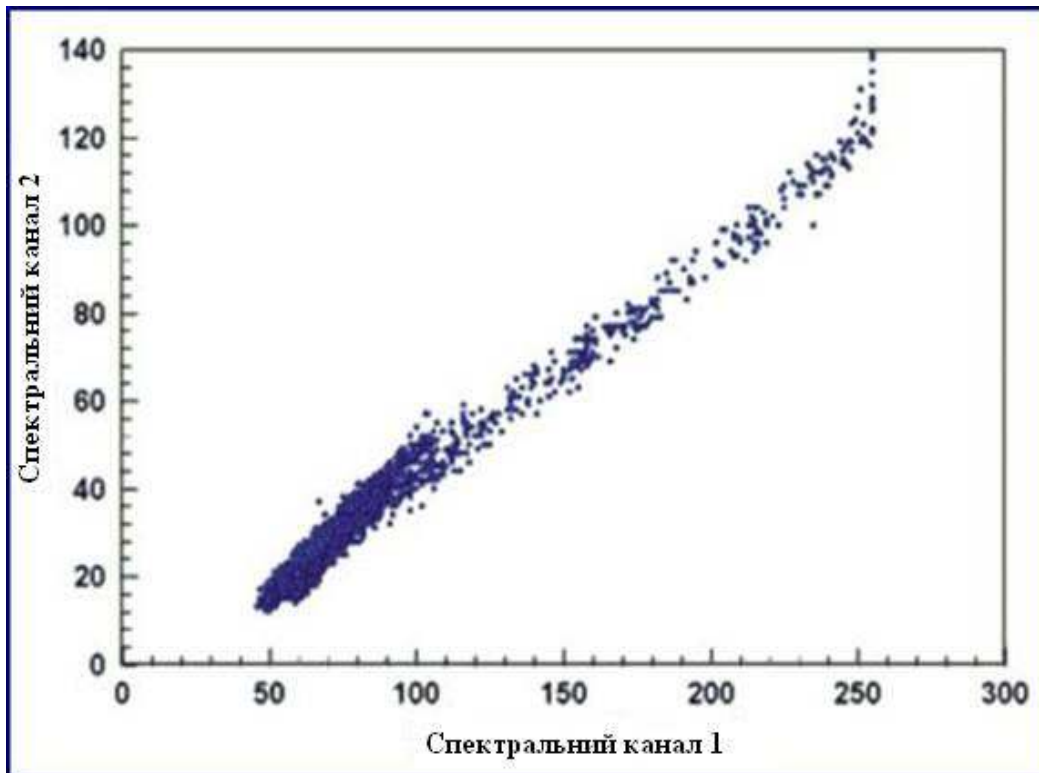
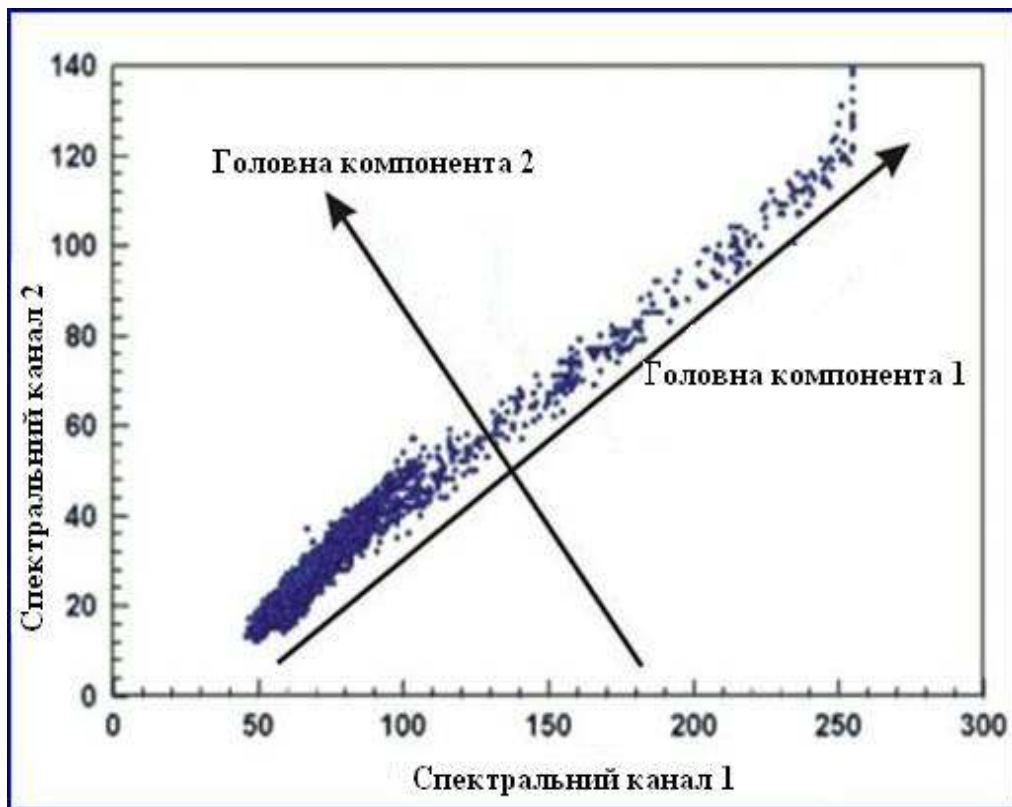


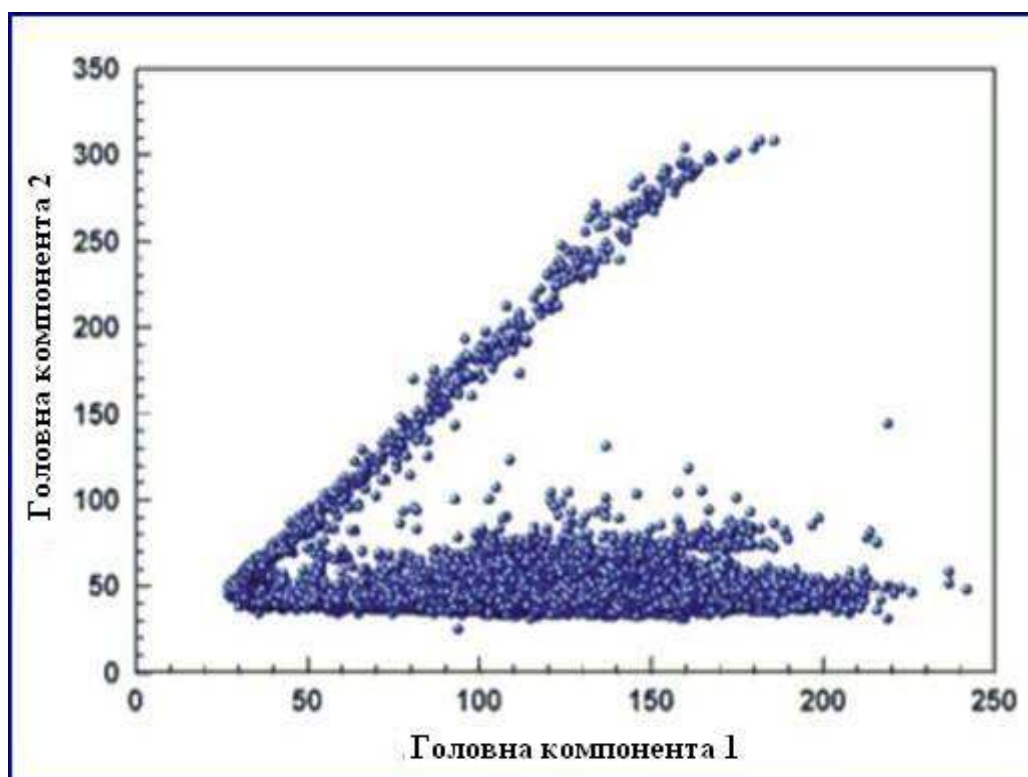
Рис. 4.23 – Поняття корельованих даних

Видно, що область розподілу значень розташована під кутом до осей графіка, тому ні по одній із цих осей не відображається весь діапазон значень об'єкта. Це значить, що при синтезі кольорового зображення знімок буде бідний кольорами. Наприклад, усі види рослинності будуть зображені близькими нерозрізненими відтінками кольору. Таке розташування значень яскравості характерно для більшості природних об'єктів (рослинності, ґрунтів, гірських порід).

Якщо осі координат розгорнути так, щоб одна з них йшла паралельно полю розподілу значень, а друга розташовувалася ортогонально, то уздовж кожної з осей діапазон значень буде максимальним, що збільшує можливості дешифрування знімка (рис. 4.24 – 4.26).



а



б

Рис. 4.24 – Поняття головних компонентів



Рис. 4.25 – Фрагмент знімка, представленого в неправильних кольорах

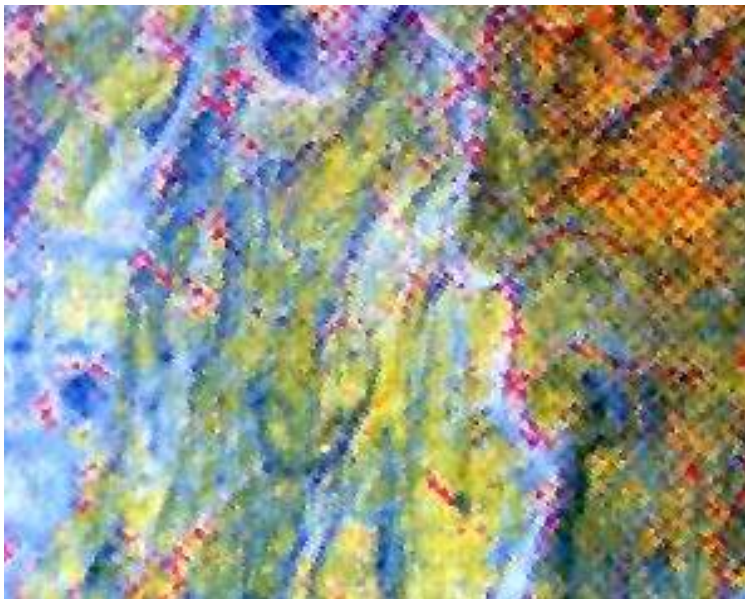


Рис. 4.26 – Той самий фрагмент знімка, оброблений за методом головних компонентів

Можливості методу аналізу головних компонентів полягають у наступному:

1) якщо знімок містить більше трьох спектральних каналів, можна створити кольорове зображення із трьох головних компонентів, оскільки в типовому багатозональному зображенні звичайно перші дві або три компоненти здатні описати практично всю мінливість спектральних характеристик. Інші компоненти найчастіше піддані шумовим впливам.

Відкидаючи ці компоненти можна зменшити обсяг даних без помітної втрати інформації;

2) якщо об'єкти малого розміру і низького контрасту погано дешифруються на вихідних знімках, вони часто добре виявляються на зображеннях окремих спектральних компонентів;

3) перетворення даних за методом головних компонентів проводять для серії різночасних знімків, наведених у єдину систему координат, для виявлення динаміки, яка яскраво проявляється в одній або двох компонентах.

Метод спектрального поділу. Один піксель знімка може відображати від декількох квадратних метрів 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 застосовують для розпізнавання на знімках об'єктів, розмір яких значно менший від розміру пікселя. Суть методу полягає в наступному: змішані спектри аналізують, порівнюючи їх з відомими чистими спектрами, наприклад, зі спектральних бібліотек чистих матеріалів (рис. 4.27). Відбувається кількісна оцінка співвідношення даного відомого (чистого) спектра і домішок у спектрі кожного пікселя. Після виконання такої оцінки можна одержати зображення, розфарбоване так, що колір пікселя буде означати, який компонент переважає в спектрі цього пікселя (рис. 4.28).

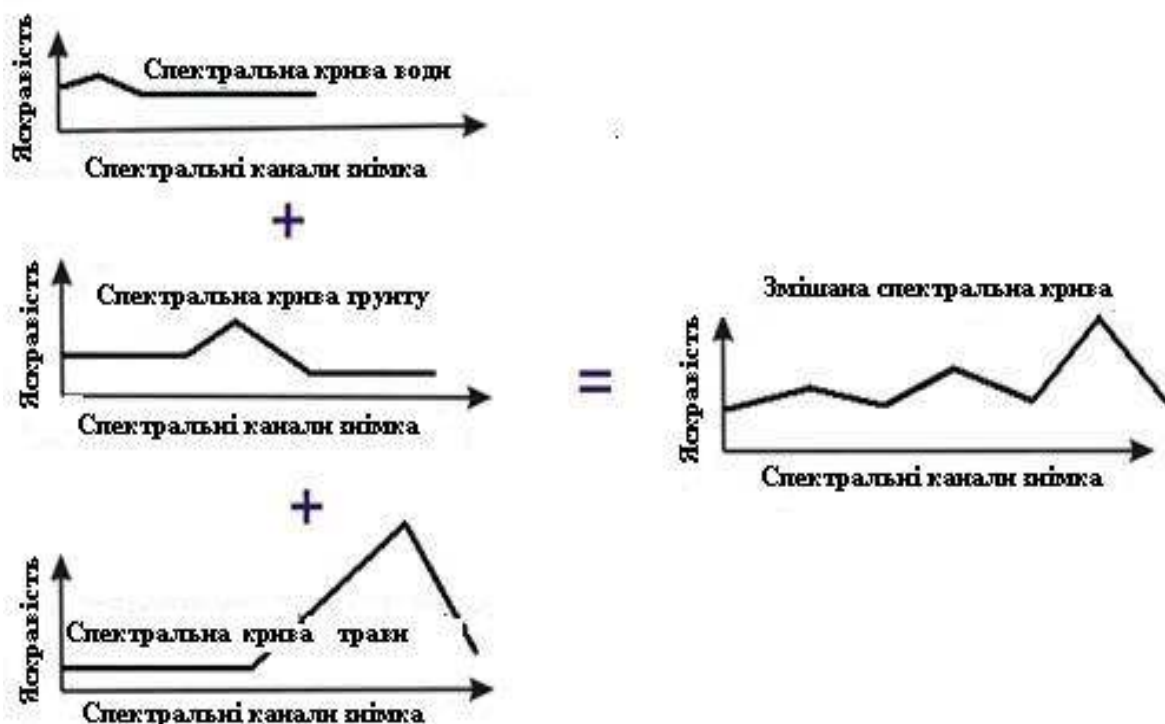


Рис. 4.27 – Спектральна бібліотека чистих матеріалів і змішаний спектр

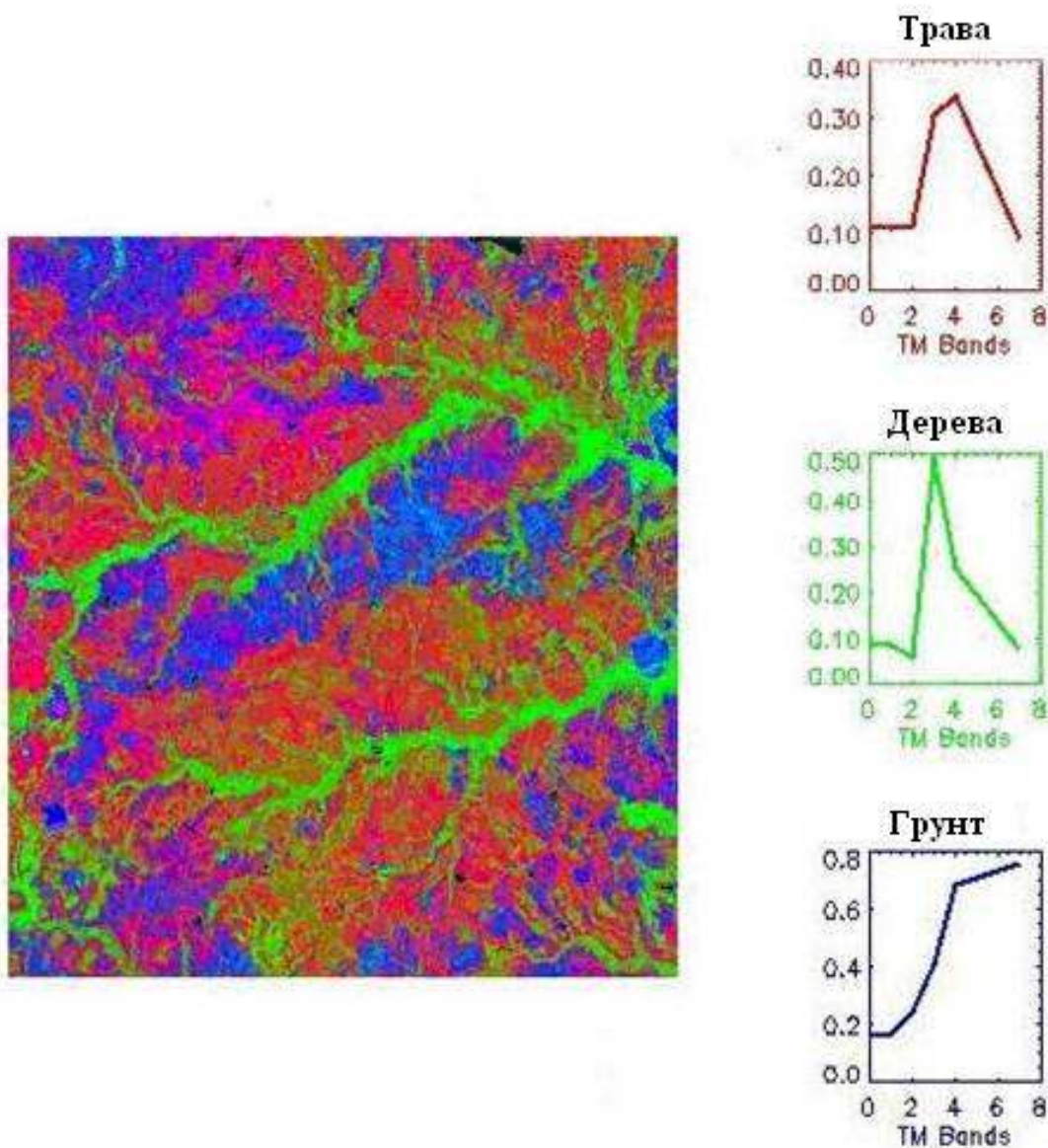


Рис. 4.28 – Застосування методу спектрального поділу

При дешифруванні застосовують методи класифікації.

Класифікація – це комп'ютерне дешифрування знімків або процес автоматизованого поділу всіх пікселів знімка на групи (класи), які відповідають різним об'єктам.

По використанню статистичних параметрів розрізняють параметричні та непараметричні класифікації. При виконанні параметричних класифікацій передбачається, що значення яскравості пікселів в отриманих класах розподілені по нормальному (гаусову) закону. Крім того, можуть бути враховані різні статистичні параметри, і чим більше їх враховано, тим точніше класифікація. Непараметричні класифікації не враховують розподіл значень спектральної яскравості усередині класу. Їх використовують або для вкрай простих випадків, або для класифікації складних неоднорідних об'єктів.

По характеру реалізації розрізняють *класифікації з навчанням і без навчання*.

Контрольні запитання

1. Що таке яскравість (тон) зображення ?
2. Що таке рисунок (структура) зображення і її типи ?
3. Що таке текстура зображення і її типи ?
4. Що таке мезоструктура зображення і її типи ?
5. Що таке макроструктура зображення і її типи ?
6. Які особливості зображення на космічних знімках у видимому діапазоні електромагнітних хвиль ?
7. Які особливості зображення на космічних знімках в інфрачервоному діапазоні електромагнітних хвиль ?
8. Які особливості зображення на космічних знімках у мікрохвильовому діапазоні електромагнітних хвиль ?
9. Перелічіть основні етапи обробки космічних знімків
10. У чому полягає службова обробка космічних знімків ?
11. У чому полягає просторова прив'язка космічних знімків ?
12. У чому полягає радіаційна корекція космічних знімків ?
13. У чому полягає тематична інтерпретація космічних знімків ?
14. У чому полягає геометрична корекція зображень космічних знімків ?
15. У чому полягає радіометричне калібрування космічних знімків ?
16. У чому полягає радіометрична корекція впливу атмосфери на космічний знімок ?
17. У чому полягає відновлення пропущених пікселів на зображенні космічного знімка ?
18. У чому полягає покращення зображення на космічному знімку за рахунок зміни контрасту ?
19. У чому полягає покращення зображення на космічному знімку за рахунок застосування методів фільтрації ?
20. У чому полягає метод кольорових перетворень зображення на космічному знімку ?
21. У чому полягає метод створення індексних зображень на космічному знімку ?
22. У чому полягає метод аналізу головних компонентів зображення на космічному знімку ?
23. У чому полягає метод спектрального поділу зображення на космічному знімку ?

5 ОПТИЧНІ ТА РАДІАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕКОСИСТЕМ

Оптичні та радіаційні властивості екосистем безпосередньо визначаються в першу чергу рослинним покривом, а там, де покриття рослинності менше 30...40%, також і ґрунтами. Рослинність і ґрунт представляють ту фізичну діяльну поверхню, яка формує відбиття падаючого сонячного світла і власне випромінювання.

Оптичні та радіаційні властивості екосистем розглядаються в чотирьох областях спектра:

- у видимій області спектра відбувається відбиття падаючого сонячного світла в інтервалі довжин хвиль 0,4...0,76 мкм.
- у найближчій інфрачервоній області спектра також відбивається сонячне світло, але в невидимому для людини інтервалі 0,76...2,5 мкм.
- довгохвильова частина спектра формує власне пасивне випромінювання екосистем, і це зображення може бути отримане як у денний, так і в нічний час. Це середня інфрачервона область спектра 3...30 мкм і далека інфрачервона область спектра 30...300 мкм.
- потім слідує досить інформативна мікрохвильова область пасивного радіовипромінювання в інтервалі 0,3...30 см.

Однак, як відзначалося раніше, не у всіх перерахованих спектральних інтервалах можлива аерокосмічна зйомка, тому що атмосфера, особливо водяна пара та вуглекислий газ, поглинає світло і випромінювання повністю або частково. Так, повністю поглинається атмосферою і виключається з дистанційної індикації далека інфрачервона область спектра. В інших областях спектра також є багато атмосферних смуг поглинання, і аерокосмічна зйомка проводиться у вікнах між ними (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Основні атмосферні вікна для аерокосмічної зйомки екосистем

Діапазон	Спектральний інтервал
Видимий	0,30...0,76 мкм
Близький інфрачервоний	0,76...0,91 мкм
	1,00...1,12 мкм
	1,19...1,34 мкм
	1,55...1,74 мкм
	2,05...2,40 мкм
Середній інфрачервоний	3,50...4,16 мкм
	4,50...5,00 мкм

продовження табл. 5.1

	8,00...9,20 мкм
	10,2...12,4 мкм
	17,0...22,0 мкм
Мікрохвильовий	2,06...2,22 мм
	3,0...3,75 мм
	7,5...10,5 мм
	2,0 і більш, см

Напівжирним шрифтом виділені найбільш прозорі ділянки спектра.

Видима область спектра 0,4...0,76 мкм найбільш інформативна як по спектральній, так і по просторовій роздільній здатності систем. Основні **екобіоморфи** рослинності (це сукупність або група рослин, не обов'язково родинних, але, що живуть у подібних умовах середовища, тобто екологічні ніші, що мають певний тип пристосувальної структури і пов'язаних з нею фізіологічних особливостей) і класи типів ґрунтів характеризуються специфічними оптичними властивостями.

Класи біоморф рослинності (біоморфи – це особливості зовнішнього вигляду, що відбивають пристосованість рослин до умов зовнішнього середовища) описуються різними кривими коефіцієнта яскравості $\rho(\lambda)$. Вимірюється коефіцієнт яскравості в основних ділянках спектра: синьому – ρ_c (при $\lambda=0,44$ мкм), зеленому – ρ_z (0,54 мкм), червоному – ρ_r (0,68 мкм) і близькому інфрачервоному – ρ_{rc} (0,78 мкм) (рис. 5.1). Їхні оптичні властивості оцінюються зональним відношенням Q як часткам при розподілі різниці порівнюваних коефіцієнтів спектральної яскравості на їхню суму.

Мезофіти (від дав.-грец. Μέσος – середній + φυτόν – рослина) – наземні рослини, які пристосовані до проживання в середовищі з більш-менш достатнім, але не надлишковим зволоженням ґрунту. Займають проміжне положення між гігрофітами та ксерофітами. Зразком середовища проживання мезофітів може служити сільський луг у помірній кліматичній зоні (приклади рослин – різноманітні види з родів мітлиця, тимофіївка, ромашка, конюшина, золотарник і ін.). Крім лугових трав, у помірному поясі до мезофітів відносяться більшість лісових трав (конвалія, медунка та ін.) і листопадні дерева та чагарники (наприклад, бук, бузок, ліщина). Однак мезофіти становлять найбільшу екологічну групу наземних рослин і поширені ширше: від помірного кліматичного пояса, у якому переважають, до тропічного сухого пояса. Мезофіти вимагають більш-менш безперервного водопостачання в період вегетації. Вони не терпимі до тривалої посухи; ксероморфізм у них відсутній або недостатньо розвинений; у надзвичайних умовах швидко втрачають вологу і в'януть. До нетривалих періодів посушливої погоди більшість мезофітів легко адаптуються, але періодично повторювані посушливі цикли та тривалі

періоди зневоднювання можуть привести до зів'янення, порушень на клітинному рівні – плазмолізу і загибелі рослин. У мезофітів у середньому помірна потреба у воді, але може широко варіюватися від виду до виду. У категорії мезофітів немає ознак специфічної морфологічної адаптації. Однак вони звичайно мають добре розвинену кореневу систему з розгалуженим корінням та широке, плоске і зелене листя, форма яких досить різноманітна. Листя більш тонке порівнянню із ксерофітами, іноді з числом устячок на нижніх сторонах листів, з тонкою кутикулою, волоски на листьях рідкі або відсутні. У тканинах листя звичайно добре структурована одношарова паренхіма, також як і шар епідермиса у верхній і нижній частині листа. Мезофіти лугів, степів і інших, добре освітлюваних сонцем місцеперебувань, мають виражені риси світлолюбних рослин (геліофіти); мезофіти нижнього ярусу лісів тіньостійкі й тіньолюбні. До мезофітів також відносять більшість ефемерів – однолітніх рослин, що живуть у напівпустельних і пустельних зонах і завершують свій життєвий цикл за дуже короткий проміжок часу (2...4 місяця), тобто за зимово-весняний сезон, коли випадає достатня кількість опадів. Переважна більшість сільськогосподарських культур, у тому числі найважливіші злакові (кукурудза цукрова, пшениця) – мезофіти.

Мезофіти, тобто рослини середніх умов зволоження й нейтральних ґрунтів, мають найбільш типові для рослинності оптичні властивості – добре виражений максимум відбиття світла в зеленій $Q_{(3-4)} = 0,45...0,6$ і в близькій інфрачервоній зонах спектра $Q_{(14-16)} = 0,7...0,8$. Максимум коефіцієнта яскравості в зеленій частині спектра досягає $0,16...0,18$, а в близькій інфрачервоній зоні спектра $0,6...0,8$. Мінімум коефіцієнта яскравості в оптично щільному рослинному покриві падає до $0,04...0,06$.

Ксерофіти (від дав.-грец. Ξερός – сухий і φυτόν – рослина) – рослини сухих місцеперебувань, здатні переносити тривалу посуху (засухостійкі). Ксерофіти становлять типову флору пустель і напівпустель, звичайні на морському узбережжі та у піщаних дюнах. Такі рослини різним образом адаптовані до посушливих умов, у яких вони ростуть. Деякі переживають екстремальні періоди у вигляді насін'я і спор, які після випадання дощу можуть проростати; нові рослини іноді за чотири тижні встигають вирости, зацвісти і дати насіння, які будуть перебувати в стані спокою до наступного дощового періоду; до таких рослин, приміром, відноситься ешшольція каліфорнійська (*Eschscholzia californica*).

Ксероморфізм – це комплекс морфологічних, анатомічних і фізіологічних ознак, що виникають у рослин як пристосування до посушливих умов проживання. Приміром, пирій (*Elytrigia*) і пісколюб (*Ammophila*) мають велику систему кореневищ і придатковими коріннями, що дозволяло їм добувати воду з водоносного шару нижче піску та існувати навіть під час сильної посухи. Ксерофіти, що ростуть у пустелях, мають пристосування до зменшення втрати води і для її запасання:

м'ясисте соковите листя бріофіллума (*Bryophyllum*), відсутність листя у більшості кактусів.

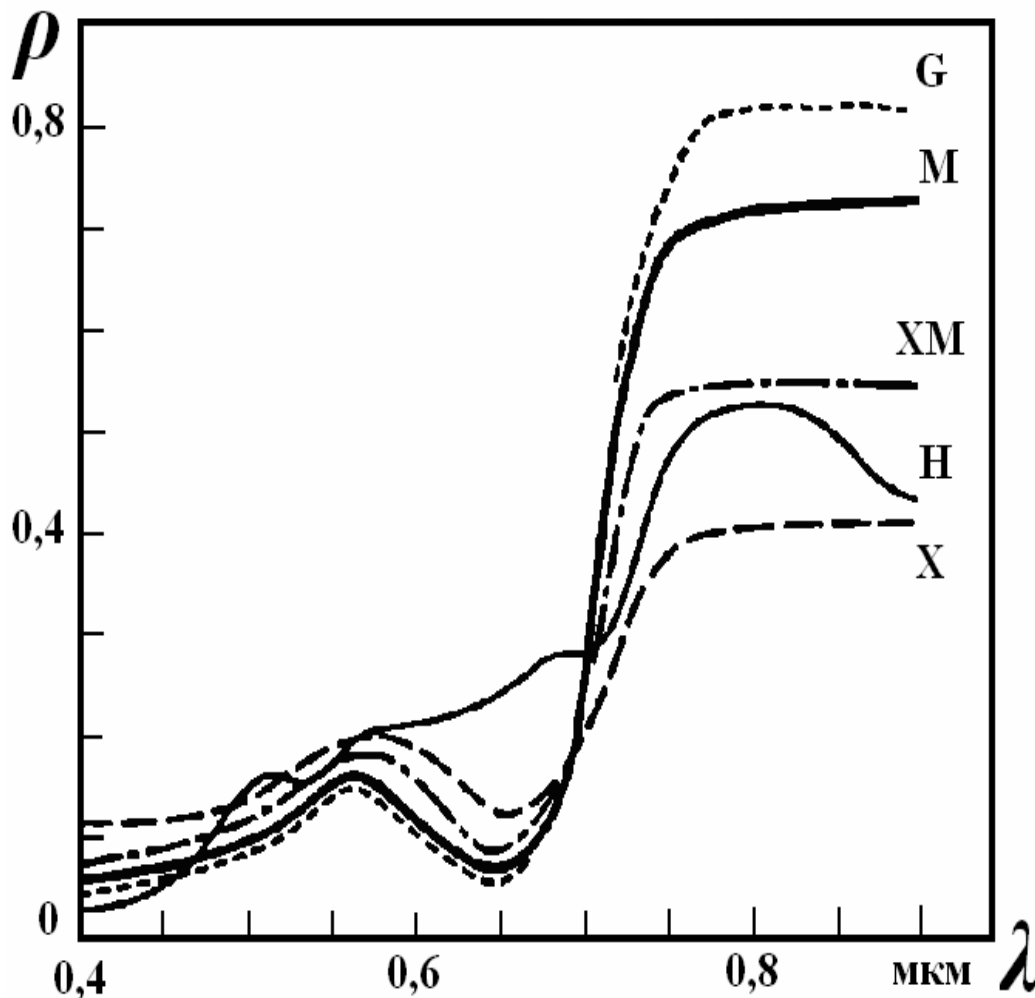


Рис. 5.1 – Коефіцієнт спектральної яскравості $\rho(\lambda)$ рослин різних екобіоморф (М – мезофітів, G – гігрофітів, X – ксерофітів, H – галофітів, XM – ксеромезофітів і гемиксерофітів)

Ксерофіти на сухих ґрунтах мають підвищений коефіцієнт яскравості в зеленій частині до 0,18...0,20, відносно підвищений у червоній до 0,10...0,15 і знижений у близькій інфрачервоній до 0,3...0,4. Усі спектральні відносини знижені: $Q_{(3-ч)} = 0,2...0,3$, $Q_{(1ч-ч)} = 0,4...0,5$.

Ксеромезофіти, евримезофіти відрізняються зниженим коефіцієнтом яскравості в близькій інфрачервоній зоні спектра 0,5...0,6 і відношенням $Q_{(1ч-ч)} = 0,6...0,7$. Такими є співтовариства *Elytrigia repens*, *Carex physodes*.

Гігрофіти (від дав.-грец. ὑγρός – вологий + φυτόν – рослина) – рослини, що живуть у місцях з високою вологістю повітря та (або) ґрунту. Категорія гігрофітів виділяється на основі особливостей фізіології і морфології рослин; найбільш характерна ознака гігрофітів – відсутність

пристосувань, що обмежують витрату вологи. Гігрофіти, як правило, відрізняються більшими і тонкими листями з незначним поверхневим захисним шаром (кутикулою), що приводить до високої кутикулярної транспірації; незначним стовщенням епідермісу, слаборозвиненою сіткою жилок; устячка в листів великі, але їх питома кількість на одиницю площі невелике. Часто листя на поверхні має волоски з живих кліток епідермісу для збільшення площі листя. За рахунок великих устячок рослини досягають оптимального регулювання транспірації. Морфологічною особливістю листя гігрофітів є наявність специфічних устячок – гідатод, які здатні виділяти вологу з листя в краплиннорідкій формі. Це необхідно рослині для нормальної життєдіяльності в умовах атмосфери, перенасиченої водяними випарами. Виділення крапель води з листя називається гутацією. Серед інших морфологічних особливостей гігрофітів — слаборозвинена коренева система, наявність довгих стебел при нерозвиненості механічних тканин, слабке одревеснення стінок судин. Подібні особливості приводять до зів'янення навіть при незначній нестачі вологи. Найбільш характерними гігрофітами є трав'янисті рослини вологих тропічних лісів. Болотні трав'янисті рослини звичайно також відносять до гігрофітів, однак по ряду морфологічних ознак вони мають відмінності. У силу постійного впливу сонячного світла і більш сухої атмосфери в них є в наявності більш товста кутикула, що приводить до зменшення кутикулярної транспірації; а листя звичайно товстіше і менше. Іноді болотні рослини виділяють в особливу підгрупу – гелофіти (дав.-грец. χέλος – болото). До гігрофітів близькі гідрофіти (водяні рослини, занурені у воду нижньою частиною) і гідатофіти (водяні рослини, що повністю або здебільшого перебувають у воді). Іноді в силу схожості морфології та умов проживання всі ці групи розглядають як одну.

Гігрофіти на надлишково зволжених ґрунтах мають високий коефіцієнт яскравості в зеленій 0,15 і близькій інфрачервоній зоні спектра 0,7...0,9. Їх $Q_{(дч-ч)}$ досягає 0,9.

Склерофіти (від дав.-грец. Σκληρός (skleros) – твердий і φύτον (phyton) – рослина) – засухостійкі рослини (ксерофіти), які мають жорсткі побіги; склерофіти добре пристосовані для проживання в посушливих умовах за рахунок сильного розвитку механічних тканин листя. Характеризуються твердим листям з товстою, що перешкоджає випаровування, кутикулою. Така особливість досягається за рахунок зменшення розміру кліток і міжклітинного простору. При дефіциті вологи в склерофітів тривалий час не спостерігається зовнішніх ознак зневоднювання; вони здатні без шкоди для себе втрачати до 25 % вологи, що втримується в них. Деревні склерофіти утворюють твердолистяні ліси, найбільш характерні для Середземномор'я (мирт, маслина, вічнозелені види дуба). Серед інших деревних порід до склерофітів відносяться деякі хвойні (наприклад, сосна). До типових чагарників-склерофітів відносять

саксаул. У країнах Середземномор'я чагарникові склерофіти утворюють великі, часто важкопрохідні зарослі (маквис і гарига; типові представники – різні види ялівця, фісташки, маслини, ладанника). У Північній Америці аналогічні зарості називаються чапараль (поширені на територіях Каліфорнії, Арізони, Мексики; найбільш типові рослини – чагарникові дуби, чумиз, деякі види мучниці). В Австралії подібні зарості йменуються скреб (характерні представники – чагарникові евkalіпти та акації). Трав'янисті склерофіти – характерні степові рослини; зустрічаються повсюдно в степових зонах (характерні представники – ковила, типчак і багато інші злаки).

Склерофіти у видимій області спектра дають такі ж оптичні характеристики, що й ксеромезофіти, але відрізняються низькими коефіцієнтами яскравості в близькій інфрачервоній зоні спектра до 0,3...0,4. Оптичний контраст склерофітів з мезофітами в цій зоні спектра досягає 0,4...0,5.

Галофіти, або **солелюбы** (від дав.-грец. ἅλς – сіль і φυτόν – рослина) – рослини, здатні переносити високі рівні засолення ґрунту (солянки, плоскухи, полині, безсмертники, тамариск і ін.). Поширені на морських узбережжях (морські марші), а також у місцевостях із сухим кліматом – пустелях, напівпустелях і навіть степах на особливих типах ґрунту – солонцях і солончаках. Нерідко мають сукулентний вигляд – з товстими стеблами та роздутим листям, що сприяє збереженню важкодоступної вологи. Звичайно характеризуються високим осмотичним тиском клітинного соку в клітках і тканинах, що дозволяє їм поглинати воду з концентрованих розчинів.

Галофіти, особливо сукулентні, дають специфічний хід $\rho(\lambda)$. Максимум ρ у зеленій частині спектра або виражений слабо, або відсутній. Коефіцієнт яскравості в червоній зоні спектра підвищено до 0,2...0,3, а в близькій інфрачервоній зоні спектра вище, чим у ксерофітів, але нижче, чим у мезофітів.

Лишайники дають своєрідні криві коефіцієнта спектральної яскравості, які відрізняються відсутністю зеленого максимуму. Для них характерні підвищені коефіцієнти яскравості у всієї фотоактичної зоні 0,5...0,7 мкм до 0,2...0,3 і низькі в близькій інфрачервоній зоні до 0,3...0,4.

У різних географічних зонах обмірювані криві коефіцієнта спектральної яскравості **основних типів ґрунтів**, їх верхнього генетичного обрію A_1 (рис. 5.2).

Торф'янисті скритопідзолисті ґрунти завдяки високому вмісту органічної речовини мають низькі коефіцієнти яскравості. Низька яскравість у синій частині спектра, відносне підвищення яскравості в зеленій і червоній частинах пов'язані з перевагою в складі гумусу фульвокислот і відносно високим вмістом окислів заліза.

Дерено-підзолисті ґрунти містять гумусу до 2,5% і дають більш

високу і менш селективну та вирівняну криву коефіцієнта яскравості.

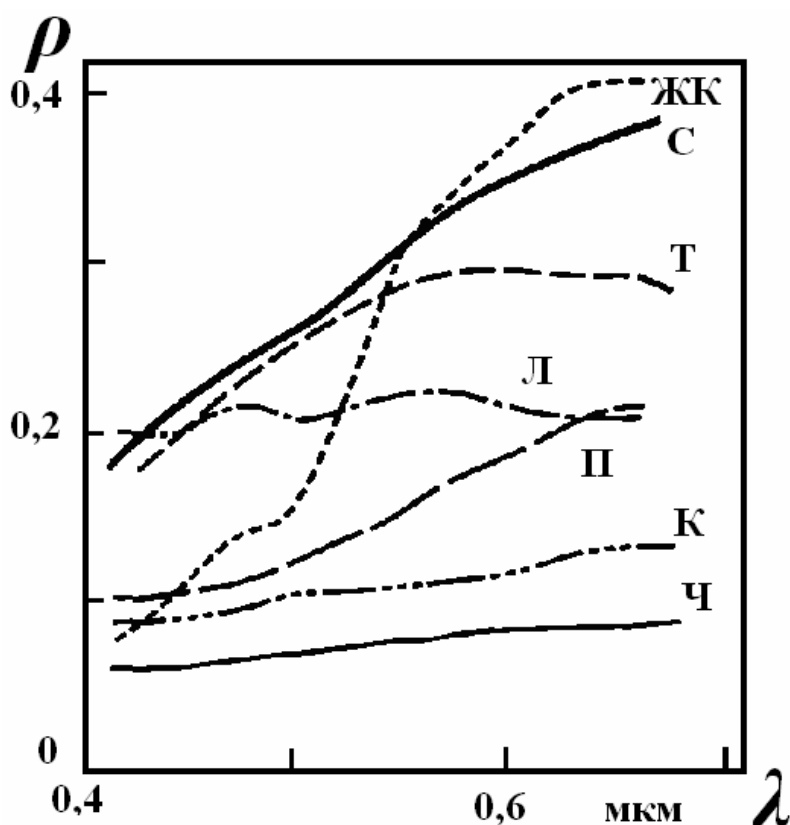


Рис. 5.2 – Коефіцієнт спектральної яскравості $\rho(\lambda)$ основних типів ґрунтів (П – підзолистий, Л – сірий лісовий, Ч – чорноземний, К – каштановий. С – сіроземний, ЖК – червоноземний, Т – такировий)

Підзолисто-глейві ґрунти сильно збагачені закисним залізом із ще більш низьким змістом органічної речовини. Це приводить до ще більшого збільшення коефіцієнта яскравості з майже горизонтальним ходом кривої і невеликим підвищенням у блакитній і жовтогарячій частині спектра.

Сірі лісові ґрунти, більш багаті гумусом, мають знижений коефіцієнт яскравості, і помітне підвищення кривої у помаранчево-червоній частині спектра.

Чорноземи звичайні зі змістом гумусу 6...8% мають найнижчий коефіцієнт яскравості та неселективний вирівняний хід кривої спектрального коефіцієнта яскравості.

Каштанові ґрунти, що містять меншу кількість гумусу з перевагою фульвокислот, більшу кількість карбонатів, дають більш високі коефіцієнти яскравості до 0,07...0,14 з помітним максимумом у помаранчево-червоній частині спектра з $Q_{(ч-с)}$ до 0,33.

Сіроземи відрізняються ще більш низьким змістом гумусу й високими коефіцієнтами яскравості 0,18...0,36 з таким же високим спектральним контрастом блакитної й червоної частини спектра.

Червоноземи бідні гумусом і багаті окислами заліза з малим коефіцієнтом яскравості в синьій частині спектра 0,07 і високим у червоній частині спектра 0,4 і найвищим спектральним відношенням $Q_{(ч-с)} = 0,7$.

Такири мають високі коефіцієнти яскравості 0,2...0,3 і характеризуються завдяки концентрації окислів заліза помітним підйомом кривій при переході від зеленої до жовтогарячої частини спектра з $Q_{(ч-с)} = 0,2$.

Пустельно-піщані ґрунти залежно від мінералогічного складу пісків дають різні коефіцієнти яскравості від 0,12 до 0,5 з помітним переміщенням підйому кривій при переході від зеленої частини спектра в більш довгохвильову червону частину з високим $Q_{(ч-с)}$ до 0,3.

Солонці при низькому змісті гумусу та великій кількості окисного заліза мають порівняно високий коефіцієнт яскравості з помітним підйомом кривої в зеленій частині спектра і максимумом у жовтій.

Солоді глеєві бідні пігментами і також мають високі коефіцієнти яскравості, їх крива слабо й рівномірно піднімається до червоної частини спектра з невеликим $Q_{(ч-с)}$ до 0,15.

Солончаки з більшою кількістю легкорозчинних солей на поверхні відрізняються найвищими коефіцієнтами яскравості серед ґрунтів і відносно високими в синьій частині спектра, що ще більш вирівнює криву з найнижчим $Q_{(ч-с)} = 0,06$.

Лугові ґрунти, багаті гумусом, дають найнижчі коефіцієнти яскравості до 0,04...0,06, що рівномірно піднімаються від синької частини спектра до червоної з $Q_{(ч-с)}$ близько 0,20.

Радіаційні властивості екосистем залежать від випромінювальної здатності складаючих їх елементів у спектральному інтервалі 3...300 мкм. Випромінювальна здатність обчислюється по відношенню спектральної щільності енергетичної яскравості досліджуваного елемента до тієї ж характеристики абсолютно чорного тіла, яке повністю поглинає падаючу на нього енергію випромінювання. На основі цього положення всі об'єкти мають радіаційну температуру, яка обчислюється стосовно цього абсолютно чорного тіла. **Чиста вода** має випромінювальну здатність квазічорного тіла 0,98...0,99 і, отже, найнижчу радіаційну температуру. Випромінювальна здатність **гірських порід** зменшується до 0,8...0,9, у деяких може падати до 0,6. **Зелена рослинність** дає порівняно високий коефіцієнт випромінювання більш 0,96, а **суха рослинність** значно нижче – 0,88...0,94.

Крім того, **радіаційні властивості екосистем** визначаються такими величинами, як теплоємність, теплопровідність і температурна інерція. Усі перераховані характеристики в конкретній гідротермальній ситуації доби, погоди та сезонів дають рівнозначні і швидко мінливі радіаційні контрасти екосистем. Усі вони формують інфрачервоне зображення, яке може бути використане для реєстрації миттєвого поля радіаційної структури

екосистеми.

Випромінювальна здатність екосистем у мікрохвильовому діапазоні 0,3...30 см визначається такими факторами, як діелектрична проникність, зрізаність або переріз поверхні, температура та вологість, і вимірюється температурою T_B у Кельвінах. На суші найвищу T_B до 300...320 К дають сухі нагріті ґрунти з рідкою та сухою рослинністю. Зі збільшенням вологості T_B падає до 200...220 К. На вологих ґрунтах T_B помітно росте зі збільшенням їх засолення. Зв'язок T_B із рослинністю неоднозначний. В одних випадках T_B рослинності піднімаються зі збільшенням її шорсткості та покриття, в інших виражене падіння T_B зі збільшенням щільності рослинного шару і його вмісту.

Контрольні запитання

1. Які елементи утворюють фізичну діяльну поверхню ?
2. У яких областях спектра електромагнітних хвиль розглядаються оптичні та радіаційні властивості екосистем ?
3. Що таке екобіоморфи ?
4. Що таке біоморфи ?
5. Яким образом прийнято ділити біоморфи на класи ?
6. Що таке мезофіти і які їхні оптичні та радіаційні характеристики ?
7. Що таке ксерофіти і які їхні оптичні та радіаційні характеристики ?
8. Що таке ксеромезофіти і які їхні оптичні та радіаційні характеристики ?
9. Що таке гігрофіти і які їхні оптичні та радіаційні характеристики ?
10. Що таке склерофіти і які їхні оптичні та радіаційні характеристики ?
11. Що таке галофіти і які їхні оптичні та радіаційні характеристики ?
12. Що таке лишайники і які їхні оптичні та радіаційні характеристики ?
13. Перелічіть основні види ґрунтів
14. У чому полягають особливості коефіцієнтів спектральної яскравості основних типів ґрунтів ?
15. Які особливості випромінювальної здатності екосистем у мікрохвильовому діапазоні спектра електромагнітних хвиль ?

6 ОЦІНКА ДИСТАНЦІЙНИХ ІНДИКАТОРІВ

Дистанційні індикатори являють собою сукупності дешифрувальних ознак (індикаторів) X для опису досліджуваних об'єктів (індикаторів) Ω .

Дешифрувальні ознаки різноманітні по складу. Це й *прямі ознаки*, як, наприклад, зерниста текстура зображення на аерофотознімках масштабу 1:15000 – індикатор крон дерев і чагарників, і *непрямі*: наприклад, сосновий ліс може служити індикатором ґрунтів легкого механічного складу. Ці індикатори ієрархічні тематично і становлять повну індикаційну функцію. Крім того, індикатори ієрархічні хорологічно і становлять систему різномасштабних рівнів. Історично ці питання були розроблені в теорії рослинних індикаторів, а потім у статистичній теорії розпізнавання образів – розбивці простору ознак на області рішень за допомогою байєсового класифікатора.

У теорії статистичних рішень оцінки дистанційних індикаторів визначаються розбіжністю простору ознаки X і об'єкта Ω . Вірогідність розпізнавання Ω по X обчислюється просторовою частотою (площею або числом) збігу області Ω і X , тобто співвідношенням області правильної індикації T до області об'єкта індикації даного класу Ω (рис. 6.1, а). Відношення T/Ω завжди менше 1.

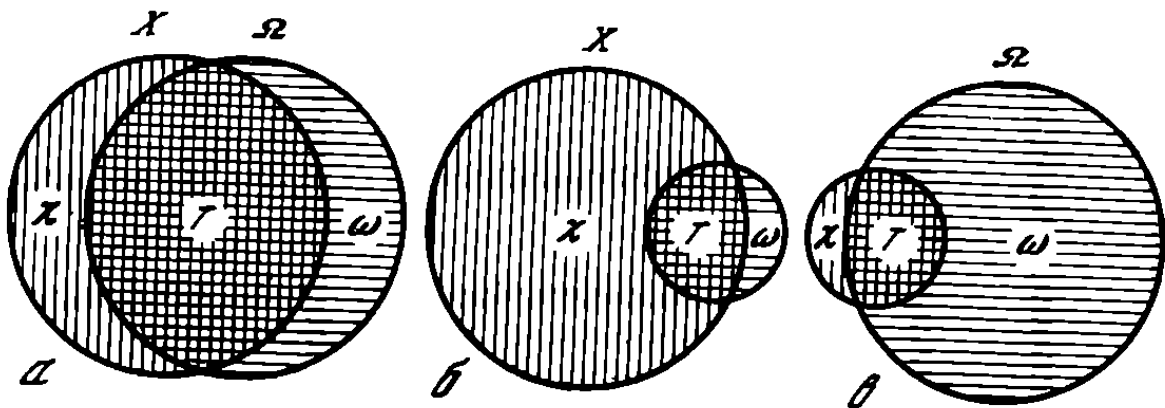


Рис. 6.1 – Співвідношення простору індикаторної ознаки X і об'єкта індикації Ω при картуванні (а) і при пошукових роботах (б і в) (T – область правильної індикації, χ – область помилок „неправдивої тривоги”, ω – область помилок „пропуску цілі”)

По частоті зустрічей індикатора на об'єкті індикації розрізняють **п'ять класів індикаторів**. Вони обчислюються у відсотках або в частках числа знаходження індикатора на об'єкті індикації T від загального числа площадок на об'єкті індикації Ω :

1. *фонові* індикатори зустрічаються на 80...100% усіх досліджених площадках на об'єкті індикації;
2. *рясні* індикатори – на 60...79%;
3. *спорадичні* індикатори – на 40...59%;
4. *рідкі* індикатори – на 20...39%;
5. *одиначні* індикатори – менш ніж на 20%.

Незважаючи на гадану простоту оцінки вірогідності індикації по T/Ω , обчислити її часто дуже важко, тому що ми ніколи не знаємо дійсного значення просторової частоти досліджуваного об'єкта Ω . Звичайно вірогідність індикації визначається на перевірочних ключових ділянках і пробних майданчиках шляхом зіставлення результатів дешифрування з наземними контактними вимірами, прийнятими нами за дійсні. Однак вони такими ніколи не бувають. Так, відносні помилки польового геоботанічного опису становлять 10%, окомірної таксації 15%, експериментальних вимірів деяких водно-фізичних характеристик 25%. Ще більш великі помилки тематичних карт, якими іноді намагаються користуватися для визначення помилок дешифрування. Так, карти сільськогосподарських угідь містять відносні помилки до 10%, агрометеорологічні до 20%, а геоботанічні й ґрунтові до 40%. Тому в тих випадках, коли вірогідності дешифрування Ω по X більше 90%, виникають парадоксальні ситуації, у яких результати дешифрування точніше наземних контрольних даних.

Крім вірогідності індикації T/Ω в індикаційних дослідженнях описується оцінка індикатора по його спряженості з об'єктом індикації (значимість) по відношенню області правильної індикації T до області ознаки (індикатору) X , тобто T/X . Величину цього показника обчислюють аналогічно T/Ω у відсотках або частках числа знаходження індикатора на об'єкті індикації T від загального числа пробних майданчиків X .

По вірогідності виділяють шість класів індикаторів:

1. *виняткові* індикатори поширені на об'єкті індикації з імовірністю правильного розпізнавання $P > 0,95$ і майже не зустрічаються поза нього,
2. *облігатні* або *постійні*, індикатори поширені майже завжди на об'єкті індикації з $P = 0,80 \dots 0,95$,
3. *факультативні*, або *змінні*, індикатори поширені здебільшого з $P = 0,6 \dots 0,79$ на об'єкті індикації,
4. *умовні* індикатори поширені з однаковою ймовірністю як на об'єкті індикації з $P = 0,40 \dots 0,59$, так і поза ним,
5. *відносні* індикатори з $P = 0,10 \dots 0,39$ переважно поширені поза об'єктом індикації,
6. *негативні*, індикатори з $P < 0,1$ майже не зустрічаються на об'єкті індикації.

Оскільки всі індикатори локальні, то на *прикладі присолончакового ландшафту* представимо ці класи.

При дешифруванні ґрунтових вод по аерофотознімках масштабу 1:5000 Західної Туркменії постійними індикаторами близьких вод (глибиною менш 5...7 м) є співтовариства *Tamarix ramosissima*. Змінними індикаторами служать співтовариства *Haloxylon aphyllum*. Умовними (тобто в певних умовах рельєфу, розташування і т.д.) індикаторами

виявляються співтовариства *Zygophyllum atriplicoides*, *Reaumuria fruticosa*. Індиферентні види *Salsola arbuscula*, *S. gemmascens*. Негативним індикатором близьких ґрунтових вод служить облігатний псамофіт *Calligonum arborescens*.

Умовні щільності розподілу ймовірностей значень ознак X об'єктів Ω і не- Ω показують два роди помилок.

В одних випадках, коли об'єкта немає, а ознака є, тобто при дешифруванні об'єкт помилково ставиться до класу Ω , відбувається помилка першого роду, або помилка змішання (комісії C), яка обчислюється відношенням просторової частоти неправильних пред'явлень індикатору X до загальної частоти (або числу та площі) об'єктів класу Ω (рис. 6.1, б). У теорії статистичних рішень помилку цього роду називають імовірністю неправдивої тривоги. Такі, наприклад, зображення на аерофотознімках Далдинського плоскогір'я Якутії заростей вільхи, які служать фоновими індикаторами кімберлітових трубок з $T/\Omega > 0,9$. Однак вони дають дуже велику помилку змішання, тому що широко поширені поза трубками на вулканічних трапах, суглинному делювії і т.п. Відношення X/Ω на багато більше 1, однак, одна вірна індикація алмазоносної кімберлітової трубки по заростях вільхи X окупає тисячі помилкових показань $X/\text{не-}\Omega$.

Помилки другого роду, тобто пропуску цілі, виникають, коли об'єкт є, а ознаки немає (рис. 1, в). Вони обчислюються по співвідношенню просторової частоти пропущених об'єктів по індикатору X до загальної частоти досліджуваних об'єктів даного класу. Так, наприклад, у Казахському мілкосопочнику сосники лишайникові служать постійними індикаторами виходів метаморфічних корінних порід з $T/\Omega > 0,9$. Однак вони дають більшу помилку пропуску цілі ω , тому що зустрічаються тільки на невеликій частині виходів корінних порід ω/Ω на багато більше 1.

Як приклад визначення кількісних характеристик індикації обговоримо результат дешифрування панхроматичного космічного знімка Сальського сухостепного ключового майдану (полігона), отриманого з корабля „Союз-9”. Поля зображуються більш темним або, навпаки, більш світлим тоном прямокутників на світлуватому-сірому тлі цілини. На 56,4% площі полігона області ознаки та об'єкта збігаються – T , що відповідає ймовірності правильного розпізнавання близько 0,91. На 3,7% площі полігона є ознака, але немає об'єкта – χ , що дає ймовірність помилки змішання 0,06. На 1,9% площі полігона є об'єкт, але немає ознаки – ω , що дає ймовірність помилки пропуску цілі 0,03. За цими даними обчислюється повна кількісна характеристика дистанційної індикації: T/Ω – вірогідність індикації (96,8%), T/X — вірогідність індикатора (93,81%), ω/T – помилка пропуску цілі (3,29%), χ/T – помилка комісії (змішання) (6,59%).

Оцінка індикаторів сильно ускладнюється через їхню

багаторівневості. Імовірності правильного розпізнавання об'єкта по індикатору на кожному рівні множаться:

$$P_0 = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_i \quad (6.1)$$

Так, наприклад, у присолончакових ландшафтах Західної Туркменії P_1 – імовірність правильного дешифрування покриття *Tamarix ramosissima* на пізньолітніх знімках масштабу 1:5000...1:10000 близько 0,9. Там же P_2 – імовірність правильного визначення глибини ґрунтових вод з інтервалами 2 м мінералізації до 7 г/л близько 0,8 по наземному індикатору – покриттю *Tamarix ramosissima*. Якщо обмежитися цими двома індикаційними рівнями, то по (6.1) інтегральна ймовірність правильної індикації близько 0,72. Таким чином, повна індикаційна функція дає знижені P_0 у порівнянні з елементарними $P_1, P_2, \dots, P_i$.

Сумарна помилка дистанційної індикації також обчислюється по сумі квадратів помилок на різних рівнях індикації:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (6.2)$$

Так, наприклад, при вимірі фітомаси екосистем по їхній спектральній яскравості сумарна помилка σ_0 складається із приладових помилок виміру яскравості σ_1 і природних помилок зв'язку фітомаси з яскравістю σ_2 . На частку приладових погрішностей доводиться 2%, а на частку погрішностей, викликаних кореляційним характером зв'язку яскравості та фітомаси, – 10%. Сумарна погрішність по (6.2) також трохи збільшується: до 10,2% у порівнянні з елементарними погрішностями.

При дистанційній індикації основним методом підвищення ймовірності правильного розпізнавання є чисельна класифікація з використанням дискримінантних і групових методів. Так, наприклад, вірогідність класифікації посівів по денситометрії та стереометрії точок збільшується з ростом числа ознак: 0,69 по одному, 0,90 по двом і 0,98 по трьом. Комбінації ознак можуть бути різної властивості:

- тон,
- рисунок або структура,
- яскравості в різних спектральних інтервалах,
- щільності зображення в різні сезони,
- інші.

Візуальна обробка знімків, наприклад, дозволяє виділяти не тільки фізико-географічні та ландшафтні зони, але і зони з різним станом сільськогосподарських культур. Виявилося також можливим урахувати ступінь їх збирання. Візуальне дешифрування космічних знімків по

викладених ознаках може бути використане в оперативній роботі при визначенні площ із різним станом рослинності.

Методи індикації або дешифрування природних утворів *по їхніх багатозональних зображеннях*, отриманих за допомогою космічних засобів, ґрунтуються на припущенні, що різні природні об'єкти мають характерні, тільки їм властиві, спектральні залежності коефіцієнта відбиття від довжини хвилі. Існування цих залежностей дозволяє автоматизувати дешифрування за допомогою ЕОМ.

Можливі *три підходи до проблеми автоматичного розпізнавання* природних об'єктів по їхніх спектральних характеристиках.

Перший з них припускає наявність апріорного каталогу спектральних характеристик усіх, що цікавлять нас природних об'єктів і типових для них фонових об'єктів. Такий каталог, або, як його іноді називають, банк спектральних характеристик, повинен мати повноту, достатню для вирішення проблеми розпізнавання. Він повинен містити дані про залежність спектральних характеристик природних утворень і їх фонів від висоти Сонця і кута візування, від пори року та стану самого природного утвору, від стану атмосфери і ряду інших факторів. Наявні каталоги не мають достатню повноту в зазначеному змісті. Саме тому перший підхід, будучи найпростішим з формальної точки зору, найчастіше важко реалізуємо на практиці.

Другий підхід заснований на тому, що, на космічному зображенні, що підлягає автоматичному дешифруванню, є невеликі тестові або ключові ділянки, для яких існує апріорна інформація про характер природних об'єктів. У цьому випадку система, що розпізнає, навчаючись на тестових ділянках, екстраполює результати навчання на інші частини зображення. При цьому процес навчання зводиться фактично до одержання спектральних характеристик природних утворень тестових ділянок у тих дискретних діапазонах, у яких працює знімальна апаратура супутника, і в тих конкретних умовах, у яких відбувається зйомка. Такий підхід приваблює тим, що відпадає необхідність у каталозі апріорних спектральних характеристик. У той же час процес екстраполяції відомостей про тестову ділянку на прилеглі території за допомогою системи, що розпізнає, можливий лише при виконанні ряду досить твердих припущень. Зокрема, тестова ділянка повинна бути репрезентативною як у частині природних утворень, що зустрічаються на ньому, так і в частині фонів. Розраховувати ж на подібну репрезентативність на скільки-небудь значних видаленнях від тестової ділянки (крім рідких випадків з надзвичайно однорідною підстильною поверхнею) досить важко і це суттєво обмежує застосовність другого підходу.

Третій підхід, який можна назвати гібридним, повинен використовувати переваги перших двох підходів, тобто опиратися і на каталог спектральних характеристик і на інформацію про тестові ділянки.

При цьому знижуються вимоги, як до повноти каталогу, так і до репрезентативності тестових ділянок.

Як приклад розглянемо застосування другого підходу – розпізнавання з навчанням на тестовій ділянці. Для аналізу використовуємо зображення в чотирьох спектральних інтервалах (0,5-0,6; 0,6-0,7; 0,7-0,8 і 0,8-1,0 мкм) із просторовим відрізненням порядку 200 м.

Обробка знімків проводилася за допомогою мікрофотометра, дані якого вводилися в ЕОМ, що здійснює по спеціальній програмі пошук заданої сільськогосподарської культури.

Навчання проводилося на одному обраному лінійному маршруті загальною довжиною 24 км і шириною 100 м, що включав у себе як шукану сільськогосподарську культуру (ячмінь) – клас k_1 , так і ряд інших сільськогосподарських культур (сорго, кукурудза, пшениця та ін.), а також пару, що утворювали клас k_2 природних утворень.

Розпізнавальна система спочатку навчався тільки на даній вибірці, здійснювала розпізнавання прилеглих ділянок поверхні, довчалася на них, забуваючи при цьому застарілу інформацію, і відсувалася крок за кроком до більш вилучених ділянок поверхні. Тим самим здійснювалося подолання труднощів екстраполяції, зв'язаних як з неоднорідностями принципового характеру (внаслідок різних ґрунтово-кліматичних умов), так і з неоднорідностями самих зображень, викликуваними деградацією якості знімків від центру до периферії.

Принцип пошуку об'єкта заданого класу на тлі довільних природних утворів заснований на мінімізації якогось інформаційного функціонала. При цьому використовується ітераційний процес оцінки „інформативності” кожного елемента багатоспектрального зображення поверхні і безперервного порівняння її з апіорною інформацією про шуканий і фонові класи, отриману на стадії навчання.

Кожна i -та ітерація являє собою обчислення функціонала виду:

$$P(k) = 4bR^2(k)2^{-bR^2(k)(1-\sqrt{1-w^2(k,i)})}bR^2(k)(1-2\sqrt{1-w(k,i)}). \quad (6.3)$$

де: $R(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x_n - m(k)]^2}$ – дисперсія спектральних амплітуд по всіх

діапазонах у класі k ; $m(k) = \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^{N_0} x_n^k$ – математичне очікування

спектральних амплітуд по всіх діапазонах у класі k ; $m(j,k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^{j,k}$ –

математичне очікування спектральних амплітуд у класі k в j -тому діапазоні; $w(k,i)$ – функція кореляції спектральних амплітуд залежно від

зсуву діапазонів відносно один одного.

Перший член у правій частині (6.3) являє собою апріорну інформацію про даний клас, другий член – інформацію про даний клас, яку несе в собі досліджуваний елемент зображення поверхні.

Суть рішення полягає в пошуку мінімуму функціонала (6.3), який досягається, коли інформація, що втримується в елементі зображення підстильної поверхні про даний клас, рівна або мало відрізняється від апріорної інформації про цей клас.

Лінійні розміри полів сільськогосподарських культур тільки в кілька раз перевищували відстань між різними точками відліків (просторовий інтервал при даному кроці фотометрування рівнявся 100 м). Тому для збільшення точності визначення границь полів (± 100 м) 4-мірний вектор спектральних амплітуд кожної точки окремо приєднувався до множини векторів спектральних амплітуд того чи іншого класу, після чого розраховувалася відповідна кількість інформації. Якщо при цьому інформація по відношенню до класу k_1 зростає (тобто значення функціонала (6.3) зменшується), а інформація по відношенню до класу k_2 убуває, то дану точку відносимо до класу k_1 . Якщо ж інформація по відношенню до класу k_1 убуває, а стосовно класу k_2 зростає, то – до класу k_2 . Якщо інформація зростає або убуває відносно й k_1 і k_2 , то порівнюються зміни інформації щодо обох класів у відсотковому відношенні, відповідно до чого і виноситься рішення про приєднання точки до того або іншого класу.

На рис. 6.2,а наведені значення функціонала (6.3) поблизу перших (після ділянки навчання) двох границь поля шуканої сільгоспкультури. На графіку можна бачити, яким образом визначалися границі полів ячменя. Верхня крива представляє залежність $P(\rho)$ для об'єкта k_2 (не ячменя), нижня – для об'єкта k_1 (ячменя), ρ – просторова координата, виражена в кілометрах.

Для обраної ділянки (10 точок) обчислювалося значення функціонала для об'єктів k_1 (ячмінь) і k_2 (не ячмінь) і виділявся об'єкт із мінімальним значенням функціонала. Спочатку мінімум функціонала має об'єкт k_2 . На границі з об'єктом k_1 функціонал для k_2 досягає мінімуму стосовно всіх прилеглих точок. Із цієї умови визначається перша границя (точка 6), після цієї точки номер об'єкта змінюється. Потім від цієї точки робиться крок уперед (на 10 точок) і знову визначаються значення функціонала для обох об'єктів. При цьому мінімальне значення в точці 17 має функціонал $P(1)$. Отже, тепер знаходиться мінімум функціонала $P(1)$. Точка 16 дає другу границю між об'єктами k_1 і k_2 (ячменем і не ячменем).

На рис. 6.2,б наведені значення функціонала $P(k)$ для кожної наступної точки. Унизу під віссю абсцис показаний дійсний розподіл полів двох об'єктів.

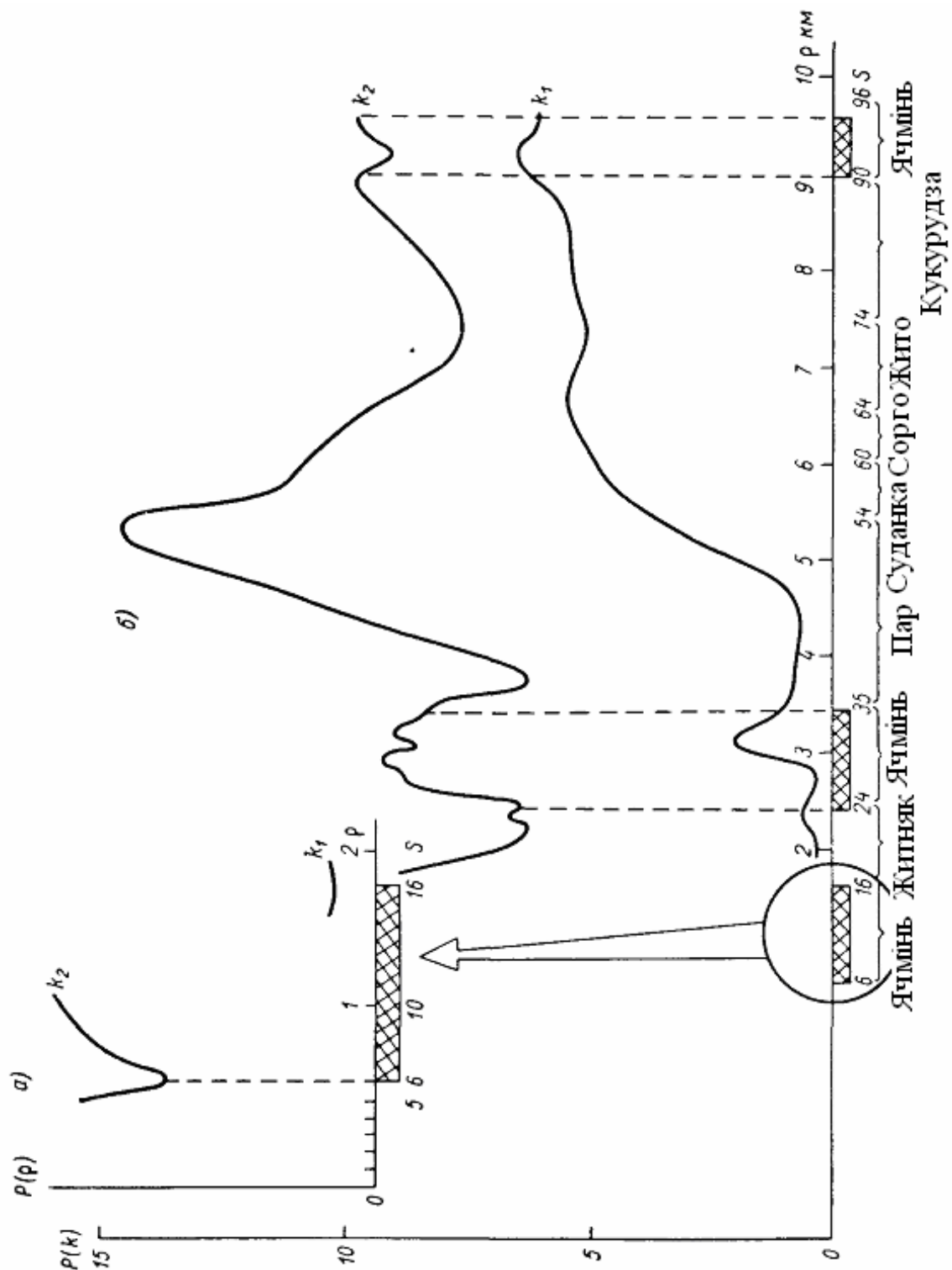


Рис. 6.2 – Вид функціоналів $P(k_1)$ і $P(k_2)$ поблизу перших двох меж шуканої сільгоспкультури (а) і в процесі розпізнавання (б)

Хід кривих на рисунку можна пояснити в такий спосіб. Якщо функціонал для об'єкта k_1 має максимум (тобто інформація мінімальна) у деякій точці, а щодо об'єкта k_2 – мінімум, то дана точка є границею поля і у ній відбувається перехід від об'єкта k_2 до об'єкта k_1 (від не ячменя до

ячменя). Якщо функціонал у даній точці має максимум для k_2 і мінімум для k_1 , то перехід походить від об'єкта k_1 до об'єкта k_2 (від ячменя до не ячменя). Якщо жодна із цих умов не виконується в розглянутій точці, то порівнюються зміни функціонала в околиці даної точки для обох класів у відсотках. Цим пояснюється, що, наприклад, між точками 24 і 35 або 35 і 90 на обох кривих є максимуми і мінімуми, а програма дані точки не розглядає як границі.

Як показали розрахунки, кількість інформації, одержуваної про той або інший клас від кожного елемента підстильної поверхні, у значній мірі визначається функцією кореляції в кожному діапазоні $w(k,i)$. Швидке убуття функції кореляції від діапазону до діапазону приводить до зменшення кількості інформації про даний клас (тобто до збільшення функціонала (6.3)), і навпаки, повільне загасання $w(k,i)$ указує на значну інформативність даного елемента поверхні про даний клас. Однак остаточний рішення у великому ступені залежить і від кількості апріорної інформації про даний клас.

Чим „інформативніший” даний клас, тобто більше нестійкість спектральних характеристик шуканого об'єкта, тим більший елемент поверхні потрібний для одержання надійної інформації про заданий клас.

Проте, метод поступового доучування і забування застарілої інформації обмежує відповідні втрати точності за рахунок необхідного збільшення кроку ітерації, оскільки апріорні кількості інформації, що обчислюються, виявляються завжди скінченими величинами.

Контрольні запитання

1. Що таке дистанційний індикатор ?
2. Який склад дешифрувальних ознак ?
3. Перелічите класи дистанційних індикаторів по частоті зустрічей індикаторів і охарактеризуйте їх
4. Перелічіть класи дистанційних індикаторів по вірогідності індикаторів і охарактеризуйте їх
5. Які помилки можливі при дешифруванні об'єктів з погляду теорії статистичних рішень ?
6. Яка сумарна помилка дистанційної індикації ?
7. Які елементи зображення космічного знімка можна використовувати для розпізнавання об'єктів і явищ ?
8. Поясніть підходи до проблеми автоматичного розпізнавання об'єктів і явищ на космічному знімку

7 ПОВНА ЕКОСИСТЕМНА ІНДИКАЦІЙНА ФУНКЦІЯ

Дешифруванням ботанічних характеристик і ґрунтових факторів екологічний моніторинг не обмежується. *Дешифрування екосистем* на аерокосмічних знімках являє собою один з розділів *розв'язання зворотних геофізичних задач*, або *задач розпізнавання образів*. Такі задачі є некоректними. Їхнє розв'язання сильно ускладнюється рядом рівнів трансформації радіометричних і геометричних характеристик на шляху від об'єкта індикації до аерокосмічного зображення. Необхідність такого багаторівневого та багатопараметричного індикаційного підходу вже давно відзначалася при розробці теорії дешифрування: виділялися, з одного боку, фотогенічні або зовнішні компоненти екосистем, що безпосередньо зображуються на знімках, а з іншого – приховані, або деципієнтні, розпізнавані лише по природних індикаторах. У результаті дешифрування вологості ґрунту проводиться з урахуванням покривної рослинності, прозорості атмосфери та світлочутливості реєструвальної апаратури.

Вивчення повних індикаційних функцій є фундаментальним завданням дистанційної індикації екосистем, у якій екосистема модулює інформацію, передану нею на зображення. Цей процес формалізується як екологічна модулююча *m*-передавальна функція. В інженерній технології вона використовується для виміру ефективності роботи апаратури. Труднощі побудови екологічних *m*-функцій полягають у тому, що екосистеми на кілька порядків складніші для калібрування, ніж апаратура, і різні параметри екосистеми важче квантифікувати, ніж параметри апаратури.

Через множинність рівнів передачі інформації від прихованих компонентів екосистеми до її дистанційного зображення потрібно розглянути ***повну структуру індикаційної m-функції***, у якій можуть бути виділені наступні основні блоки:

- 1) I – апаратурний, або інструментальний,
- 2) A – атмосферний,
- 3) S – геофізичний блок діяльної відбивної або випромінюючої поверхні,
- 4) Y – ботанічний,
- 5) P – ґрунтовий,
- 6) H – гідрологічний,
- 7) G – геологічний.

Повна індикаційна m-функція записується в наступному виді:

$$m(I, A, S, B, P, H, G) = \varphi(I, A, S, B, P, H, G). \quad (7.1)$$

У наш час індикаційні функції досліджені недостатньо, багато зв'язків

між параметрами фізично не вивчені та математично не описані. Тому починати треба з опису індикаційних функцій на окремих блоках зв'язку, а потім їх послідовно підставляти для побудови m -функції.

Інструментальна індикаційна функція I визначається технічними параметрами реєструвальної апаратури: спектральною чутливістю з роздільною здатністю, геометричними властивостями оптики, частотою зйомки

$$I = \varphi (R_\lambda, R_R, S_R, T_\omega, n), \quad (7.2)$$

де R_λ – спектральне відрізнєння, або ширина спектрального інтервалу одного каналу багатоспектральної камери, R_R – радіометричне відрізнєння, S_R – просторове відрізнєння, T_ω – часова частота реєстрації системи, n – число каналів системи.

Інструментальна функція детально описана в спеціальній літературі. Найбільш важливою I -функцією є характеристична крива зв'язку оптичної щільності негативного фотографічного зображення D_{neg} з експозицією H_S у поточній точці характеристичної кривої. Вона має логістичну форму із крильми, що асимптотично простягаються уздовж осі H_S . Однак по технічних умовах, як правило, завжди доводиться працювати на прямолінійній ділянці цієї кривої, тому на практиці використовується більш проста лінійна функція вигляду

$$D_{\text{neg}} = \alpha + \gamma \lg H_S, \quad (7.3)$$

обмежена експозиціями H_{S1} і H_{S2} , де α – оптична щільність, відповідна до системи світлочутливості, γ – коефіцієнт контрастності фотографічного зображення.

Дослідника цікавить у першу чергу **природна (або енвайронментальна) індикаційна функція**, яка описує трансформацію енергії та інформації від об'єкта дослідження до дистанційного приймача:

$$E (A, S, B, P, H, G) = \varphi (A, S, B, P, H, G). \quad (7.4)$$

Атмосферна індикаційна функція A має особливо велике значення при космічній зйомці та висотному аерозніманню і описана по ряду параметрів. Одним з найважливіших контролюючих параметрів є просторово-часовий розподіл хмарності. У середньому близько 60% земної кулі покрито хмарністю, але часова частота її вкрай нерівномірна. По цій частоті визначається число космічних фотографувань території n з випадковими датами для одержання хоча б одиничного зображення всієї поверхні. При певній хмарності ймовірність успішної зйомки досліджуваної території $PM = 0,95$ може бути обчислена за формулою:

$$S_{(S_Q+S_I)}^n < 1 - P_M \quad (7.5)$$

де $S_{(S_Q+S_I)}^n$ – площа покриття поверхні хмарністю S_Q , тінню S_I .

Для урахування функції розподілу хмарності складені спеціальні карти повторюваності хмарності на земній кулі, по яким можна визначити ймовірність одержання безхмарного космічного зображення місцевості в різні сезони. Потім ураховується вплив повітряного серпанку, що послабляє оптичні контрасти підстильної поверхні, особливо в спектральних інтервалах поглинання водяною парою. Передатні характеристики атмосфери (А-Функція) для коефіцієнта яскравості на рівні Землі ρ_0 розраховується по формулі

$$A\text{-функція} = \frac{\xi(1+\chi)}{1+\chi/\rho_0} \quad (7.6)$$

де χ – коефіцієнт задимленості, ξ – відношення компонентів передатних характеристик атмосфери по вимірах еталона на земній поверхні, на літаку та супутнику.

В аридних і субаридних районах великий вплив запиленості та задимленості атмосфери. Він враховується по інтенсивності світлового потоку, який виходить з атмосфери I , де перший член рівняння описує ослаблення інтенсивності світла за рахунок розсіювання в чистій атмосфері, другий – ослаблення світла пиловою хмарою, а третій – ослаблення світла, відбитого від пилової хмари, атмосферою,

$$I = I_0 A_{dust} \exp(-2\tau') \quad (7.7)$$

де I_0 – інтенсивність падаючого світлового потоку, A_{dust} – альбедо пилу, τ' – оптична товщина атмосфери над пиловою хмарою.

Оскільки атмосферну передатну функцію в практиці дистанційної індикації важко визначити, то для її контролю проводиться підсупутникове геофізичне еталонування. Така стандартизація А-функції виконується за допомогою синхронних наземних, літакових і супутникових вимірів еталонних майданчиків у тих самих спектральних інтервалах. Такі фото– і радіометричні еталони являють собою природні утворення достатньої довжини з експериментально обмірюваними або апріорно відомими оптичними або радіаційними характеристиками, які добре розпізнаються на космічних знімках. Наступним етапом еталонування є побудова для еталонної поверхні характеристичної кривої зв'язку інтенсивності дистанційного сигналу (наприклад, D_{neg}), обмірюваного з літака або

супутника, із сигналом, обмірюваним наземно (наприклад, ρ) у тому самому спектральному інтервалі. Еталонування безпосередньо на літаку або супутнику (наприклад, за допомогою сенситометричного клину) не виключає впливу атмосфери, освітленості і піддане порушенню енергетичного балансу.

Для підсупутникового еталонування використовувалися різні оптично однорідні поверхні. Це позбавлені рослинності піщані арени, солончакові кори, чиста і глибока вода, води різної мутності, полин на піщаних сіроземах різного проективного покриття, щільні хмари різного ярусу, оптично щільний вегетуючий рослинний покрив, позбавлені рослинності сирі ґрунти.

Основним блоком повної індикаційної функції є **геофізична індикаційна функція** діяльної поверхні S , яка формує відбивні та випромінювальні характеристики екосистем. Глибина діяльної поверхні визначається проникаючою здатністю випромінювання, яка, у свою чергу, залежить від довжини хвилі та фізичних властивостей поверхні. 90% інтенсивності дистанційного сигналу формується шаром від 2 до 8λ , тобто від часток мікрметрів до дециметрів. S -функція описується шляхом виміру оптичних і радіаційних властивостей рослинності та ґрунтів з літака з невеликих висот, де вплив атмосфери незначний, наземно або навіть лабораторно. Описані в літературі численні геофізичні індикаційні функції зв'язку коефіцієнта спектральної яскравості із проективним покриттям, фітомасою, листяним індексом, концентрацією хлорофілу, висотою, вологовмістом рослинності і вологістю, вмістом гумусу та солей у ґрунті. Вони представляють градуйовані криві зв'язку, необхідні для кількісного дешифрування кожного класу екосистем.

Ботанічна індикаційна функція B описується по зв'язку зовнішніх характеристик рослинного покриву, що безпосередньо відображаються на аеро— і космічних знімках (наприклад, зімкнутість крон, проективне покриття) зі схованими характеристиками рослинного покриву (наприклад, діаметр стовбура) і екосистем (наприклад, зволоження ґрунтів, глибина підземних вод). Форми B -функції принципово визначені вже давно: максимальна частота появи індикатора припадає на ділянку екологічного (або фітоценотичного) оптимуму. Недостатня або надлишкова інтенсивність екологічного фактора приводить до зниження частоти появи індикатора. У результаті, B -функція, як правило, описується нормальним, логарифмічно нормальним або біноміальним розподілом індикатору.

Нормальний розподіл ботанічних індикаторів в аналітичному виді записується так:

$$f(B) = a \exp\left(-\left(\Delta B^2 / 2\sigma^2\right)\right) \quad (7.8)$$

де $\Delta B = B_i - \bar{B}$, тобто відхилення змінного значення індикатору B_i від середнього арифметичного $\bar{B}$, f – частота індикатора, σ – середнє квадратичне відхилення індикатору, $a = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$.

При $\Delta B = 0$ f припадає на максимум при оптимальному значенні екологічного фактора. Нормальний розподіл в екології зустрічається рідко, тому що незалежних змінних в екосистемах практично немає. Розподілом, близьким до нормального, апроксимуються головним чином постійні індикатори з високими оцінками міцності зв'язку ознак з екологічними факторами (рис. 7.1).

Більш складні ботанічні індикаційні В-функції дають змінні індикатори, яких більшість. Змінні індикатори в різних екологічних умовах показують із різною ймовірністю однакові градації екологічного фактора. Для них характерно логарифмічно нормальний розподіл зі значною позитивною асиметрією. Такі індикаційні функції пояснюються тим, що ті самі градації екологічного фактора в різних його інтервалах виявляють різний екологічний вплив. Так, наприклад, у змінних індикаторів вплив однакових градацій близько залеглих ґрунтових вод більш сильніший, ніж глибоких. Це приводить до того, що максимум появи частот індикатору зміщується убік близьких ґрунтових вод, де вплив їх градації більш сильний (рис. 7.1).

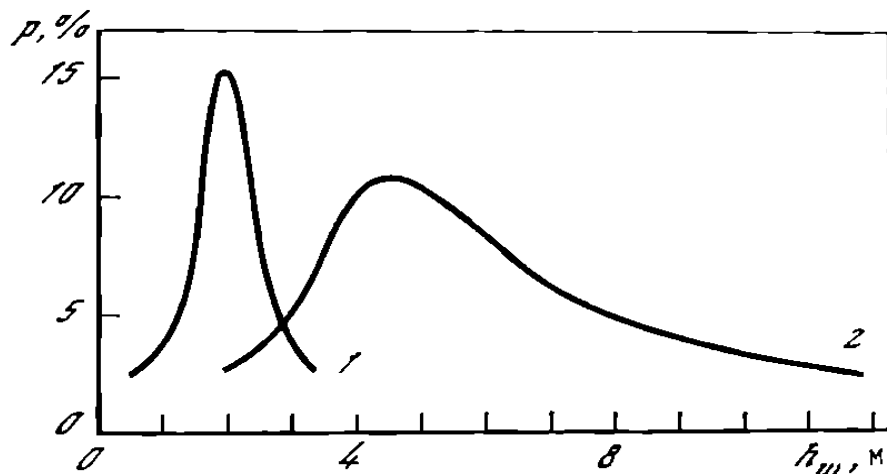


Рис. 7.1 – Графіки статистичного розподілу проективного покриття p залежно від глибини ґрунтових вод h_w у присолончакових ландшафтах Західної Туркменії: 1 – нормального (*Tamarix ramosissima*), 2 – логнормального (*Haloxylon aphyllum*)

Існують ще більш складні, у тому числі і баговершинні, форми В-функції, які ще не описані аналітично. Крім того, потрібно враховувати, що В-функції піддаються сильному впливу локальних екологічних і

фітоценотичних умов, а також антропогенній трансформації. Ці впливи до деякої міри виключаються при екстраполяції градуйованих функцій у межах ландшафтів-аналогів.

Грунтова індикаційна функція Р описує зв'язок характеристик геофізичної діяльної поверхні ґрунту, що безпосередньо формують дистанційний сигнал, з характеристиками ґрунтового профілю та ґрунтоутворюючих порід. Глибина діяльного обрію ґрунту визначається проникаючою здатністю електромагнітного випромінювання в спостережуваних ділянках спектра, яка сильно варіює залежно від фактури поверхні, вологості, засолення і механічного складу ґрунту. Через умовність цього визначення в оптичному діапазоні за діяльний обрій ухвалюють A_0 0...2,5 (5) см і в мікрохвильовий – A_I 0...10 (20) см.

Зв'язок між вологістю поверхневого обрію ґрунту 0...2,5 (5) см w_0 і вологістю ґрунтового профілю до 1...2 м w_h описується різними рівняннями залежно від типу водного режиму в даній гідротермічній ситуації. При пермацидному (промивному) водному режимі вологість ґрунту по профілю із глибиною зменшується, при ексудативному режимі, навпаки, збільшується. При більш складних комбінаціях спостерігається накладення вертикальних градієнтів вологості ґрунтів по профілю.

Гідрологічна індикаційна функція Н описує зв'язки між поверхневими та ґрунтовими водами, верховодкою в зоні аерації і ґрунтовими водами, а останніх, у свою чергу, з підземними водами.

Геологічна індикаційна функція Г зв'язує поверхневі прояви геологічної будови з будовою фундаменту. Однією з найцікавіших функцій цього класу є зв'язок новітніх тектонічних розривів, розпізнаваних у пухких відкладаннях, із простяганням глибинних розламів. Функції Н и Г виходять за рамки екосистем і не розглядаються.

Після того як описані **часткові індикаційні функції**, необхідна їхня **інтеграція**.

Інтегруються індикаційні функції І і А. Таким чином, наприклад, **описується зв'язок інструментальної передатної функції** $I=\varphi(N)$ з **урахуванням впливу атмосфери А на якість зображення**:

$$I - A = \varphi(J_0, J_N, J_w, J_A) \quad (7.9)$$

де J_0, J_N, J_w, J_A – контрастно-частотні характеристики відповідно об'єктива, фотоплівки, зсуву зображення, оптичної щільності атмосфери.

Більші зусилля були прикладені до інтегрування функцій І, А і S. Таким чином, наприклад, **описується функція формування фотоактиничної деталі фотографічного зображення**

$$I - A - S = \alpha K_\lambda + \gamma \log \left[(E_\lambda T_\lambda \rho_\lambda + E_\lambda^0) \tau B_{0\lambda} t \right] \quad (7.10)$$

де K_λ – спектральний розподіл світлочутливості плівки, α – параметри прояву, γ – контрастність, E_λ – спектральний розподіл енергії висвітлення, T_λ – спектральне ослаблення світла атмосферою, ρ_λ – спектральний розподіл яскравості деталі земної поверхні, E_λ^0 – спектральна яскравість атмосферного серпанку, τ – спектральне ослаблення світла фотоапаратурою, $B_{0\lambda}$ – спектральна інтенсивність падаючого світла, t – час експозиції.

Емпіричним шляхом функція I – A – S у графічному або аналітичному запису використовується при двоступінчастій технології визначення фітомаси та вологості ґрунту по фотографічних зображеннях.

Не завершилися дотепер успіхом спроби опису **повної „енvironментальної” індикаційної функції E**

$$E = \varphi(C_R, S_R, T_R, A_R, X_R) \quad (7.11)$$

де C_R – кількість помітних природних одиниць, S_R – розмір і просторове розміщення одиниць, T_R – міра просторової мінливості одиниць, A_R – міра атмосферних викривлень (головним чином, міра імовірності одержання безхмарного зображення), X_R – інші фактори природного середовища.

Чисельного вирішення цієї функції немає.

Найбільш успішним є аналітичний **опис повної індикаційної функції** шляхом **додавання часткових функцій по блоках**.

На закінчення необхідно відзначити, що повний опис індикаційних функцій ще неможливий, тому що відсутні експериментальні дані, які описують перераховані параметри в аналітично заданих функціях. Тому їх математичний опис і фізичне обґрунтування представляють головне завдання розробки теорії аерокосмічного моніторингу.

Контрольні запитання

1. Яка структура повної індикаційної m -функції ?
2. Яка структура інструментальної індикаційної функції ?
3. Яка структура енvironментальної індикаційної функції ?
4. Яка структура атмосферної індикаційної функції ?
5. Опишіть геофізичну індикаційну функцію
6. Яка структура ботанічної індикаційної функції ?
7. Опишіть ґрунтову індикаційну функцію
8. Опишіть гідрологічну індикаційну функцію
9. Яка структура інтегрованих індикаційних функцій ?

8 АЕРОКОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ АГРОЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Опишемо модель інформаційної структури регіональної системи аерокосмічного моніторингу сільськогосподарських угідь із урахуванням зв'язку декількох факторів:

- інформаційних потреб у вирішенні задач по оцінці стану сільськогосподарських культур,
- реальних можливостей сучасної супутникової апаратури,
- реальних можливостей різних інформаційних каналів,
- тематичного полігонного забезпечення,
- технологій тематичного дешифрування.

Ця модель регіональної системи аерокосмічного моніторингу на основі дистанційного та контактного контролю над станом сільськогосподарських земель і, головним чином, за станом рослинного покриву ґрунту (як індикатора) забезпечує різним сільськогосподарським споживачам і державним регулюючим і контролюючим органам вирішення цілого ряду задач в агроекологічній сфері.

Моніторинг факторів, що впливають на формування врожайності сільськогосподарських культур, виконується за комплексною схемою (рис. 8.1). У цій схемі оцінюються основні фактори, що формують урожайність сільськогосподарських культур (блок 1), а саме, тепло-холод, снігове покриття, водоспоживання рослин (ґрунтова волога, поливи, атмосферні опади), мікрорельєф, режим живлення, ерозинність, мочаристість, пирогенність, лісомеліорація, стихійні лиха, забруднення ґрунту, антропогенне навантаження (блок 10). На основі цієї оцінки ухвалюється рішення про використання необхідного комплексу засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що надає потрібні дані (блоки 2-9), тобто типи цільової апаратури, космічні апарати, персональні засоби приймання супутникової інформації, бази даних супутникових знімків, вимоги до часової дискретності зйомок, вимоги по під супутниковій інформаційній забезпеченості, у тому числі з тематичних полігонів (блок 11), програмне забезпечення (блок 14). Надалі здійснюється моделювання врожайності (блок 13) із застосуванням ГІС (блок 12), результати якого надаються споживачам (блок 15).

Розглянемо основні блоки моделі інформаційної структури регіональної системи аерокосмічного моніторингу агроекологічних систем, при цьому врахуємо, що блоки 2-9 вивчалися раніше.

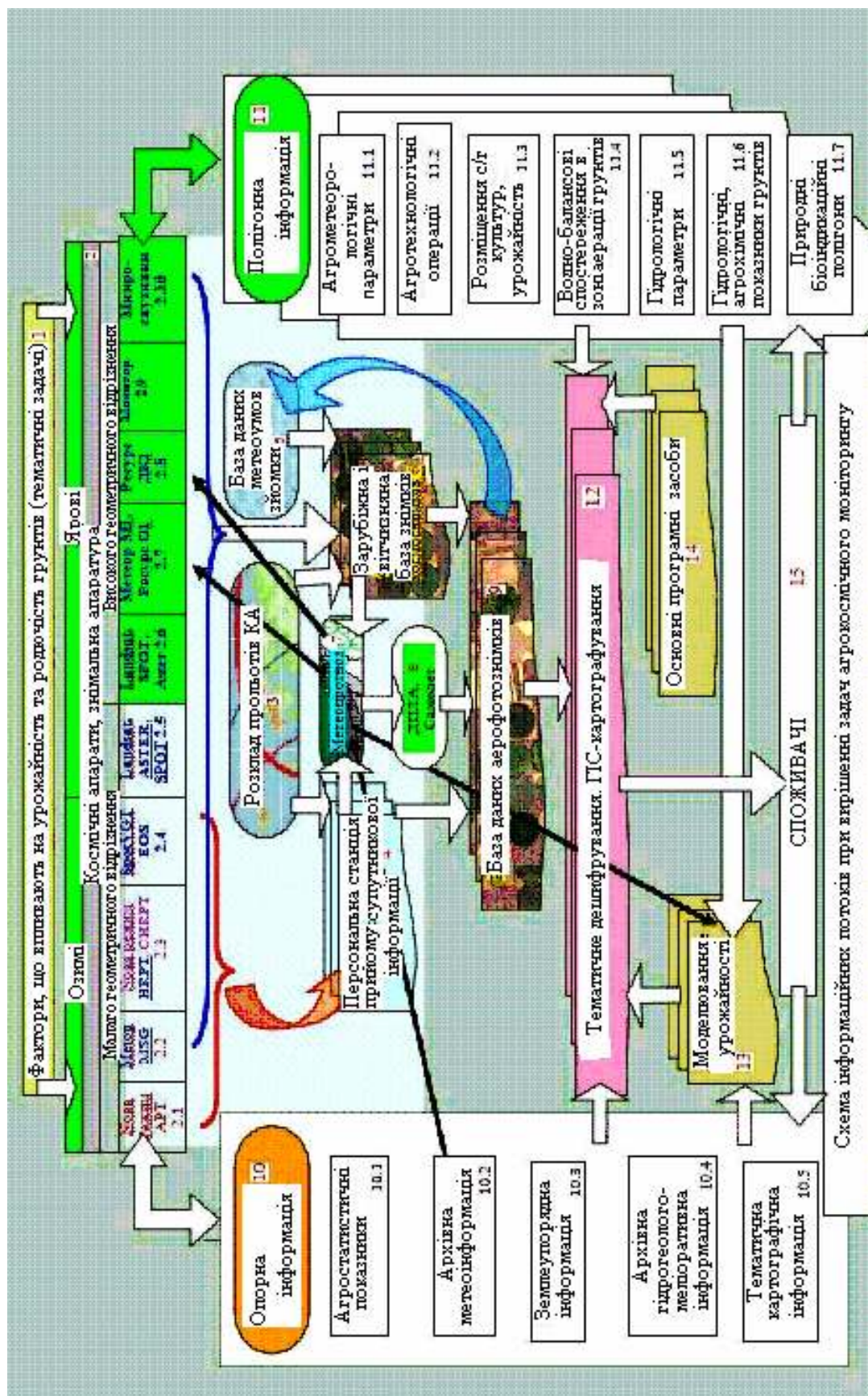


Рис. 8.1 – Інформаційна структура регіональної системи аерокосмічного моніторингу сільськогосподарських угідь

8.1 Фактори, що впливають на врожайність і родючість ґрунтів (Блок 1)

До *головних факторів*, прямо контрольованих космічними апаратами, відносяться: атмосфера безхмарна, хмари, дими, сніг, лід, вільна вода, ґрунтова волога, рослинний і ґрунтовий покрив.

Фактори, як правило, є основними (тестовими) об'єктами спостережень, тому що дуже часто відіграють роль космічних індикаторів у задачах по визначенню стану навколишнього середовища. Фактори повинні бути підібрані залежно від характерних природно-господарських рис регіону.

Наприклад, запилена атмосфера показує наявність пилових часток, що переносяться дуже часто у високих шарах атмосфери з південних спустошених районів; хмари індікують напрямки вітру (у тому числі і з боку промислових об'єктів, що виділяють в атмосферу різні окисли азоту, сірки та ін., що сприяють формуванню кислотних дощів), зміна погодних умов, місця утворення та місця випадання атмосферних опадів, місця і строки утворення гроз і градів; просторовий розподіл снігу характеризує снігозатримувальну та вологонакопичувальну ефективність лісосмуг, ступінь укриття озимих зернових; стан рослинного покриву ґрунту на окремому сільськогосподарському полі (ділянці поля) характеризує поточна ґрунтова родючість конкретного поля (ділянки поля), його строкатість, пов'язана із природними факторами, що формують біопродуктивність агроценозів, а також з ефективністю (якістю) основних технологічних прийомів, застосовуваних для вирощування врожаю; просторово-часовий стан рослинного покриву в регіональному масштабі дозволяє виконувати унікальний, космічний біокліматичний аналіз природно-господарських і антропогенних умов виростання основних фітоценозів у регіоні; дими промислових підприємств у сукупності з наземною метеорологічною інформацією дозволяють становити карти забруднення території продуктами димових викидів і враховувати їхній негативний вплив на зниження врожайності овочевих культур.

Побічно *по головних факторах*, прямо контрольованих космічними апаратами, можна визначити показники, що характеризують формування врожайності та родючості ґрунтів: тепло-холод, покриття або не покриття снігом, водоспоживання рослин, водний режим ґрунту, поливи, атмосферні опади, мікрорельєф, режим живлення ґрунту, ерозійність, мочаристість, пирогенність, лісомеліоративний ефект, стихійні лиха, забруднення ґрунту, соціальні та економічні умови сільськогосподарського землекористування.

Головні фактори зображуються на знімках по-різному, залежно від використовуваного спектрального каналу й стану моніторингового об'єкта.

Наприклад, атмосфера: прозора або замутнена (запилена); хмари: високі або низькі, „сухі” або вологонасиченні, характерні за формою,

часової динаміки та простору утворення; сніг, свіжовипавший сніг, пухкий або злежалий, „сухий” або мокрий, поталий, забруднений; лід: молодий або старий, тонкий або товстий; вода: глибока або мілка, прісна або солона, мутна або прозора; рослинність: зрошувана, незрошувана, вегетуюча або зів'яла, вологозабезпечена або піддана посусі, свіжополита (спосіб поливу, тип дощувальної машини), підгодована (внесення ранньої весни азотних добрив), уражена шкідниками або хімікатами, скошена (прямим комбайнуванням, на звалення), вирубана, випалена, витоптана, полегла, лугова, сільськогосподарська (види сільгоспкультур), характерна по динаміці біопродуктивності в часі; ґрунт: гумусована або карбонатна, осолоділа, підтоплена, перезволожена, свіжополита, зволожена дощем, піддана приморозку, свіжозорана, малопотужна (з підґрунтовими глинами, що близько залягають), розроблена під траншею, котлован, кар'єр, рекультивована.

Дешифрування окремих факторів або сукупності ряду факторів становить основу технологічного ланцюжка при вирішенні тематичних задач, основні з яких представлено в таблиці 8.1. Згідно з даними табл. 8.1 моніторинг основних факторів, що впливають на врожайність сільськогосподарських культур, здійснюється по сезонах року в масштабах регіону і у масштабах поля з визначенням джерел космічної картографічної та опорної апріорної інформації.

Згідно тому, який фактор контролюється, використовується відповідна космічна інформація з рекомендованого космічного апарата або групи космічних апаратів.

8.2 Опорна апріорна інформація (Блок 10)

Блок підготовки опорної апріорної інформації, будучи складовою частиною підсистеми збору підсупутникової інформації, являє собою банк інформації, що складається з локальної бази даних і системи керування нею.

База даних містить наступні блоки:

- агрономічна статистична інформація (блок 10.1);
- архівна метеорологічна інформація. В обов'язковому порядку створюється багаторічна метеорологічна база даних з основними метеорологічними показниками й можливістю їх статистичної обробки (блок 10.2);
- землевпорядна інформація (блок 10.3);
- архівна гідрогеологічна й меліоративна інформація (блок 10.4);
- тематична картографічна інформація (блок 10.5).

Таблиця 8.1 – Тематичні завдання по ідентифікації стану посівів і факторів, що впливають по сезонах року на врожайність сільськогосподарських культур у масштабах регіону і у масштабах поля

№ № п/п	Завдання	Регіональний режим (район)			Локальний режим (поле)		
		сезон			сезон		
		осінь	зима	весна-літо	осінь	зима	весна-літо
1	Ідентифікація видів ґрунтового-рослинного покриву сільськогосподарських земель	2.3, 2.4, 2.5	—	2.3, 2.4, 2.5	2.6	—	2.6
2	Короткостроковий прогноз і оперативне коректування режиму випадання атмосферних опадів під час посівної і збору	2.1, 2.2, 2.3, 10.3	—	2.1, 2.2, 2.3, 10.3	—	—	—
3	Визначення оптимальності строку посіву озимих і умов їх яровизації	2.3, 2.4	—	—	—	—	—
4	Аналіз умов перезимівлі	—	2.3, 2.4, 2.5	—	—	—	—
5	Аналіз стану озимих при виході із зими	—	—	2.3, 2.4	—	—	2.6, 8
6	Контроль якості виконання агротехнологічних операцій	—	—	—	—	—	2.6, 2.7, 2.9, 2.10, 8
7	Оцінка впливу весняного заморозку	—	—	2.3, 2.4	—	—	8
8	Контроль посушливих умов	—	—	—	—	—	2.6, 10.2, 11.4
9	Оцінка ефективності роботи осушувальних систем	—	—	2.3, 2.4	2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 8	2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10	2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 8

продовження табл. 8.1

10	Прогноз урожайності ранніх зернових	—	—	2.3, 2.4	—	—	2.6
11	Вирівнювання „клаптевої родючості”	—	—	—	—	—	2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 8, 10.4

Примітка: Цифри в таблиці позначають необхідні інформаційні джерела і проставлені згідно рис. 8.1.

8.3 Полігонна інформація (Блок 11)

Блок полігонної інформації, також будучи складовою частиною підсистеми збору підсупутникової інформації, являє собою банк інформації з полігона, що складається з локальної бази даних і системи управління нею.

Ця база даних по полігону містить наступні блоки:

- агрометеорологічні параметри полігона (блок 11.1);
- дані по агротехнологіям (блок 11.2);
- дані про розміщення сільськогосподарських культур і їх урожайності по полігону (блок 11.3);
- дані водно-балансових спостережень у зоні аерації ґрунтів (блок 11.4);
- гідрогеологічні параметри полігона (блок 11.5);
- гідрологічні, агрохімічні показники ґрунтів (блок 11.6);
- дані по природним біоіндикаторним полігонам (блок 11.7).

Основним підсупутниковим локальним полігоном у роботі служать поля і тестові ділянки (приклад на рис. 8.2). На всі поля і тестові ділянки щорічно виготовляється паспортна відомість із урахуванням таких показників, як тип ґрунту, механічний склад, площа, вид сільськогосподарської культури, урожайність. Приклад оцінки полігона, безвідносно до району, наведений нижче.

Крім того, проводиться додаткове вибіркове обстеження полів великих землекористувачів розташованих поблизу полігона.

Агрометеорологічні параметри полігона (Блок 11.1).

Приклад. Основними кліматичними факторами, що визначають умови росту та розвитку сільськогосподарських культур є тепло і волога.

Враховуючи тепло– і вологозабезпеченість, регіон можна розділити на 2 агрокліматичних райони. Перший агрокліматичний район займає північну половину території області. Другий займає південну.

По агрокліматичним умовам територія полігона займає проміжне положення між двома основними агрокліматичними районами області.

У цілому по агрокліматичним умовам основні проблеми продуктивності сільського господарства в регіоні пов'язані з недоволіком тепла і надлишком вологи.

Згідно агрокліматичного районування країни в завданнях агрокосмічного моніторингу даний регіон може слугити аналогом для деяких інших регіонів.

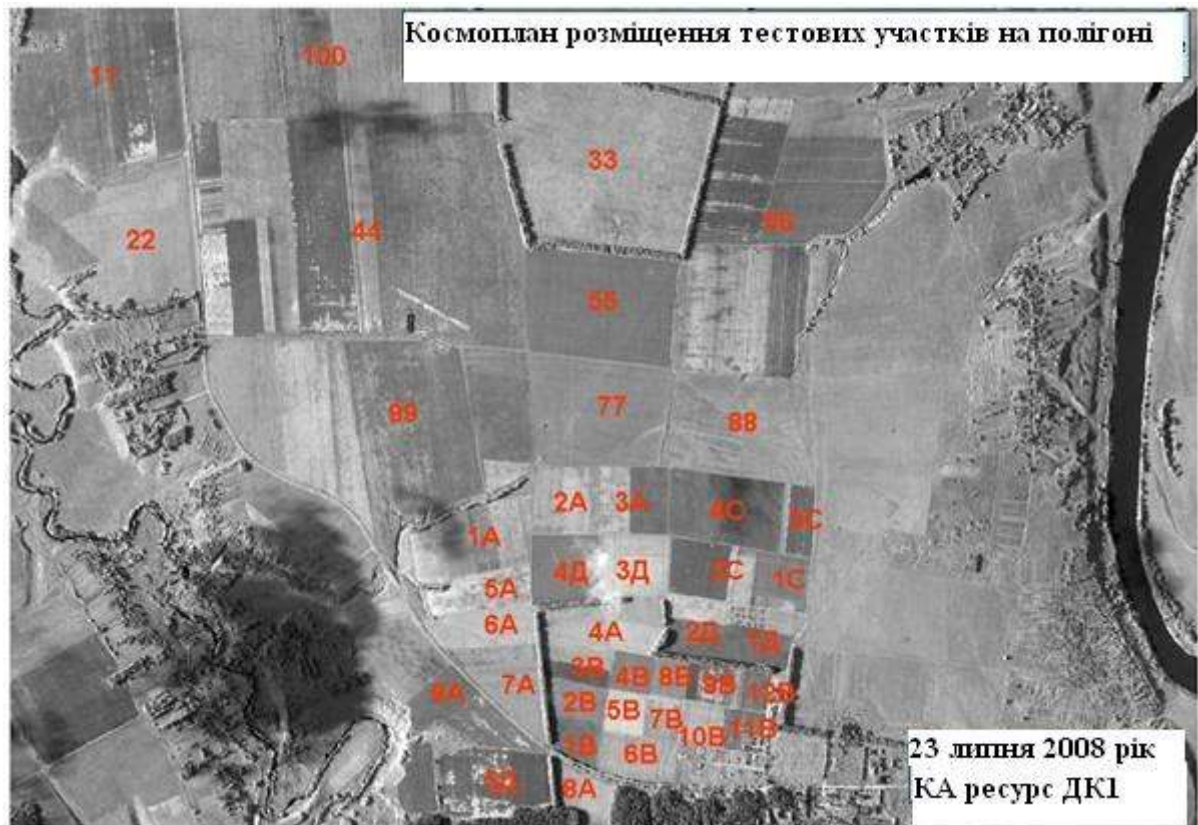


Рис. 8.2 – Ситуаційний космоплан розміщення тестових ділянок на полігоні

Агротехнологічні операції (основні види підсупутникових спостережень на полігоні) (Блок 11.2).

- Контроль над розміщенням сільськогосподарських культур;
- Контроль над строками та видами агротехнічних операцій;
- Водно-балансові розрахунки;
- Баланс живильних елементів на конкретних полях і тестових ділянках;
- Контроль над поточними агрометеорологічними параметрами;
- Фенологічні спостереження: сходи; кущіння; вихід у трубку; розгалуження (колосіння); цвітіння; молочна спілість; воскова спілість; повна спілість;
- Підрахунок густоти стояння рослин;

- Динаміка росту рослин;
- Облік біологічного врожаю зеленої маси;
- Облік біологічного врожаю зерна. Визначення його структури та хімічного складу;
- Контроль над гідрогеологічними параметрами;
- Аналіз архівних матеріалів по історії полів;
- Лабораторні аналізи (визначення агрохімічних властивостей ґрунту; визначення водно-фізичних властивостей ґрунтів на конкретних полях; визначення вологості ґрунту; аналіз ґрунту на вміст живильних речовин: азот, калій, фосфор, гумус, нітрати, кислотність; живильна цінність корму).

8.4 Паспорт підсупутникового тестового агрокосмічного полігона

Необхідною умовою функціонування тестового агрокосмічного полігона в структурі агрокосмічного моніторингу із застосуванням методів дистанційного зондування є наявність свого роду паспорта полігона – документально зафіксованих особливостей полігона, об'єктів, видів спостережень і т.п. – який являє собою по суті єдину систему управління базами даних (СУБД) і містить у собі наступні основні елементи:

- Назва полігона. Його код у системі регіональних полігонів.
- Адміністративна прив'язка.
- Географічні координати поворотних крапок границі полігона.
- Опис природної зони (фізико-географічний район); Визначення зони репрезентативності полігона в регіоні.
- Перелік типів об'єктів, узятих під спостереження (ґрунтові, рослинні, водні), ключові ділянки, крапки контролю.
- Просторово-часові характеристики природно-господарських умов полігона (бази даних):
 - 1) Гідрогеологічні умови;
 - 2) Ґрунтові умови;
 - 3) Агрохімічні умови;
 - 4) Гідрологічні умови. Водно-балансові характеристики;
 - 5) Землевпорядні умови;
 - 6) Геоморфологія;
 - 7) Кліматичні умови;
 - 8) Погодні умови. Агromетeоролoгічні параметри;
 - 9) Безхмарність неба. Прозорість атмосфери;
 - 10) Природний рослинний покрив;
 - 11) Ландшафтна структура території;
 - 12) Історія полів, ключових ділянок;
 - 13) Стан і режим експлуатації водогосподарчих меліоративних

об'єктів і зрошувально-осушувальних систем.

- Методи наземного контролю.
- Засоби наземного контролю.
- Методи дистанційного контролю.
- Засоби дистанційного контролю.
- Параметри, які підлягають контролю:
 - 1) Каталог еталонів спектральних характеристик, палітр об'єктів спостережень;
 - 2) Відбивні характеристики;
 - 3) Випромінювальні характеристики;
 - 4) Поляризаційні характеристики;
 - 5) Дешифрувальні ознаки (біоіндикаційні, текстурні, геометричні, яскраві);
 - 6) Надійність ознак (тіснота зв'язку між спектральними характеристиками об'єктів і параметрами ґрунтово-рослинного покриву). Біокліматичні моделі.

Важливою складовою частиною інформаційної системи агрокосмічного моніторингу є „банк знань”, який містить у собі різну інформацію про об'єкти спостережень:

- контури об'єктів спостережень на цифровій топографічній основі для вирішення питань моніторингу (інвентаризації) антропогенних рослинних екосистем;
- спектральні криві агроценозів, у тому числі для різних умов виростання рослин і технологій оброблення посівів, банк спектральних даних хворих і ушкоджених рослин, інформацію про наявність відбивної здатності рослин-індикаторів забруднення навколишнього середовища, відомості про морфологічні, морфометричні характеристики рослинних об'єктів залежно від умов виростання і т.д. З опорою на багаторічні агрометеорологічні дані по місцевій метеостанції, а також на супутникові дані, треба мати попередні тестові криві для розпізнавання основних сільськогосподарських культур у регіоні (рис. 8.3).

На підставі рис. 8.3 складається календар агрокосмічного моніторингу (рис. 8.4).

Окремої уваги заслуговує організація мережі регіональних природних біоіндикаційних полігонів. Під природні біоіндикаційні полігони відбираються досить більші площі земель, на яких відсутній антропогенний вплив на стан рослинного покриву. До таких земель слід віднести: заповідники, військові полігони, лісові масиви, плавні в устьях рік, заливні луки, болота, підтоплені неорні землі, піски.

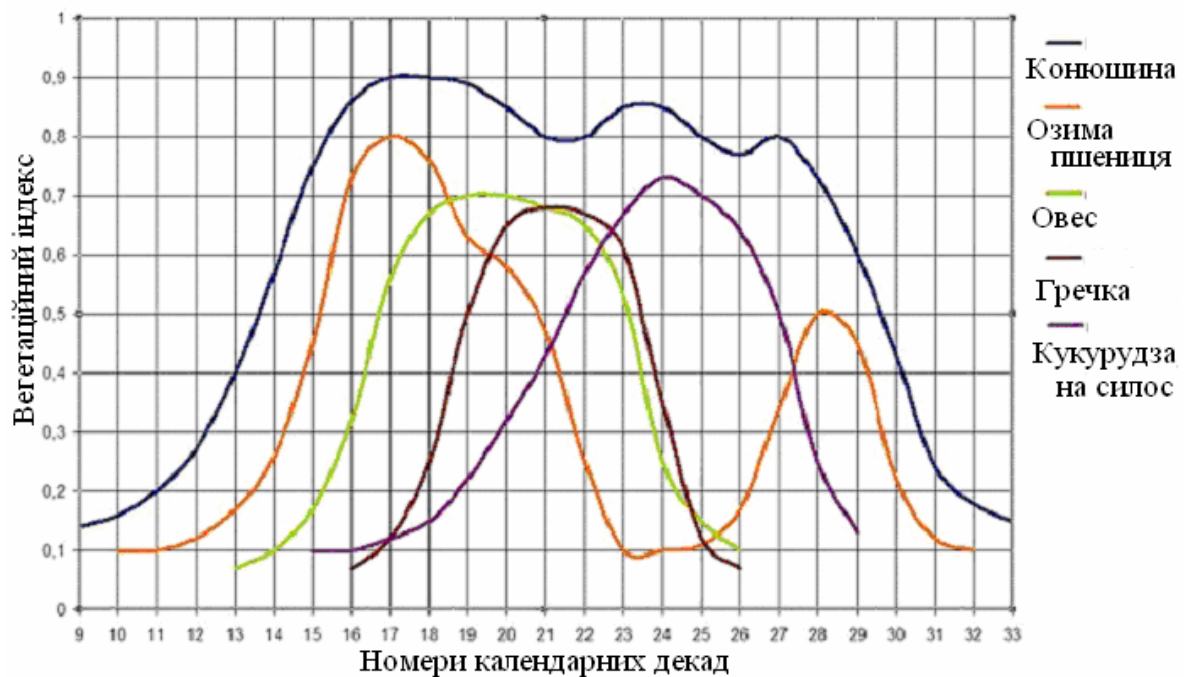


Рис. 8.3 – Побудова тестових кривих для розпізнавання та прогнозу врожайності (біопродуктивності) основних сільськогосподарських культур у регіоні

Агрофітоценоз	Календарний період пошуку на знімках	Моніторинговий період	Календарний період значень яскравості посівів
Озима пшениця	Середині травня вересень	Вересень-жовтень; квітень-липень	Червень, початок жовтня
Конюшина	Кінець квітня початок травня	Квітень-жовтень	Червень
Овес	Червень	Кінець травня кінець серпня	Липень
Гречка	Кінець червня Початок липня	Червень-серпень	Кінець липня Початок серпня
Кукурудза	Липень	Червень-вересень	Кінець серпня початок вересня

Рис. 8.4 – Календар агрокосмічного моніторингу

За спостереженнями за біоіндикаційними полігонами створюється багаторічна космобіокліматична база даних з основними параметрами, використовуваними в вирішенні задач по аналізу стану навколишнього середовища та можливістю їх статистичної обробки:

- багаторічні криві біопродуктивності основних фітоценозів, побудовані по супутникових знімках (рис. 8.5);
- визначення біокліматичних залежностей показника „вегетаційний індекс” від суми температур повітря (рис.8.6), від вологозабезпеченості рослин, від сумарного випару, від інтенсивності заморозку (рис. 8.7, 8.8), від проективного покриття ґрунту, від гумусовмісту ґрунтів (при різних рівнях дефіциту вологозабезпеченості ґрунту) для окремих природних фітоценозів, спостереження за настанням основних строків фаз вегетації;
- визначення погодних умов, що формують динаміку біопродуктивності сільськогосподарських посівів-аналогів (рис. 8.8).

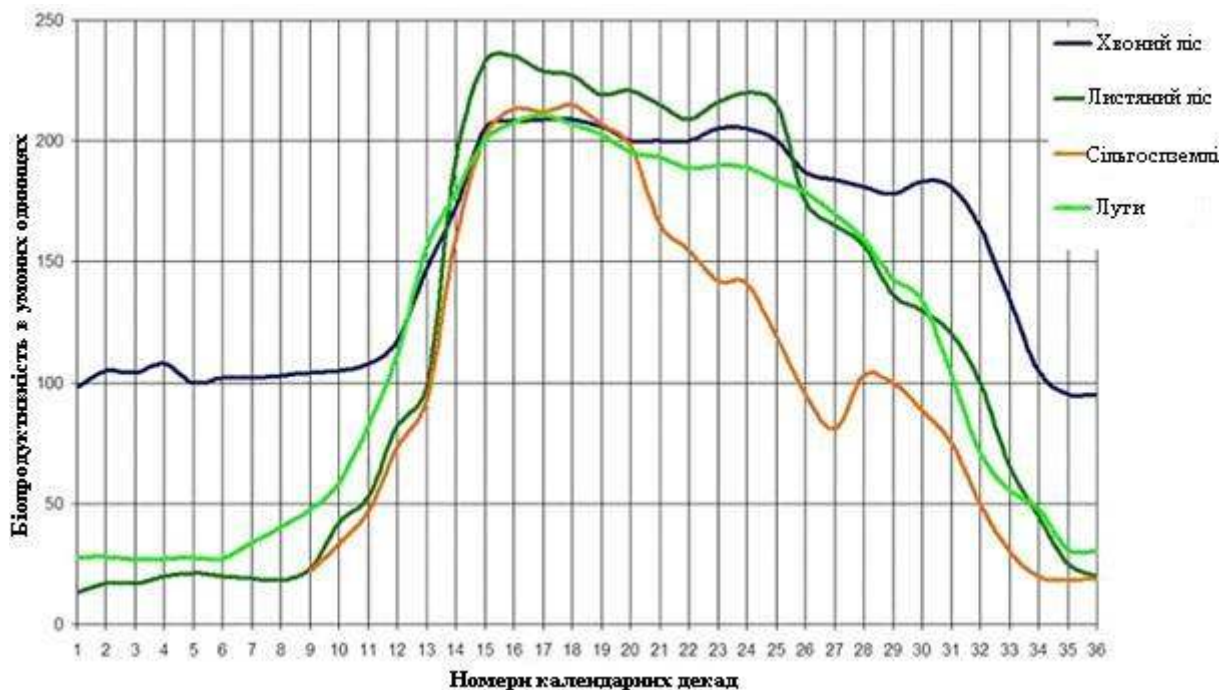


Рис. 8.5 – Динаміка середньобагаторічної біопродуктивності основних фітоценозів регіону

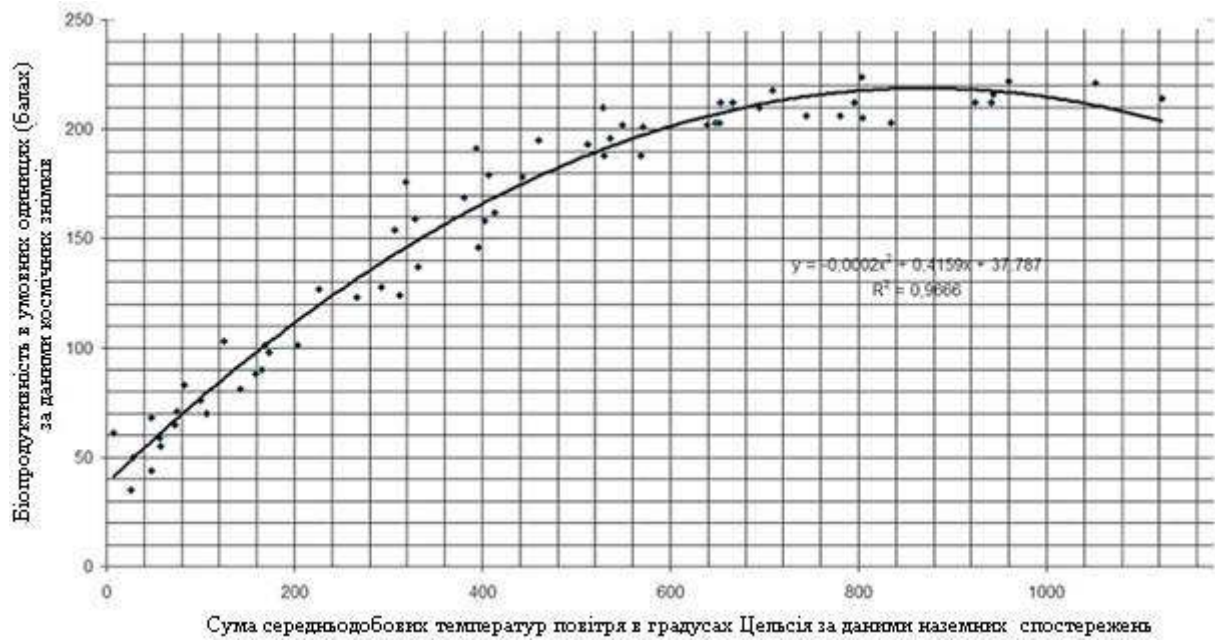


Рис. 8.6 – Залежність біопродуктивності ділянки в період активної вегетації від суми температур повітря за багато років

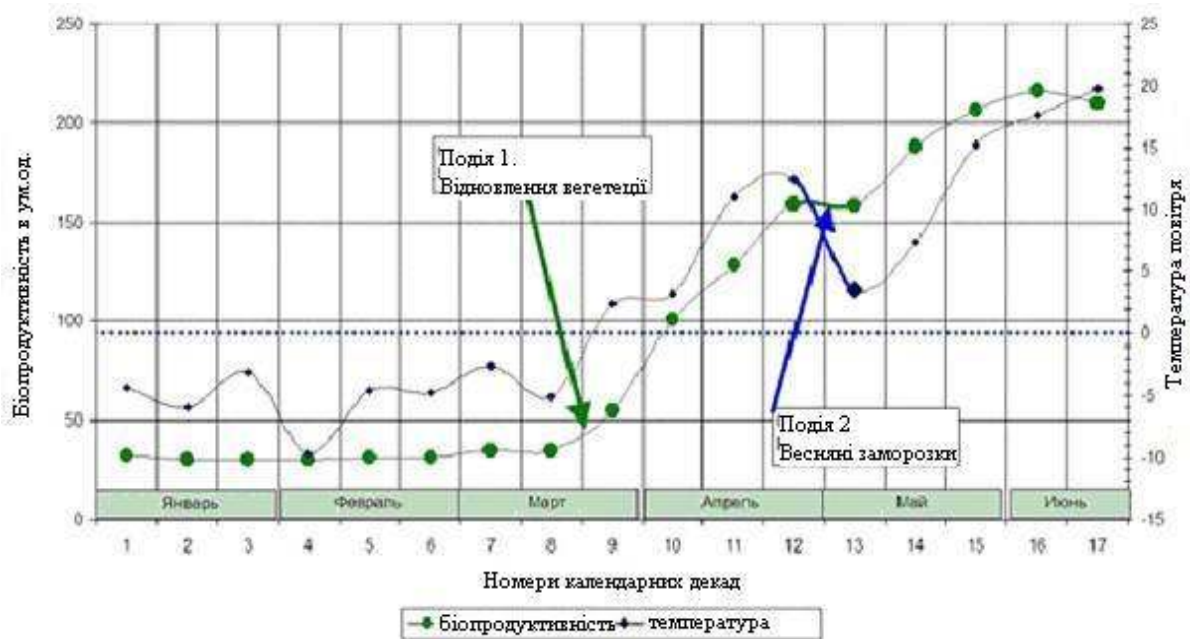


Рис. 8.7 – Визначення основних подій вегетаційного розвитку фітоценозів за даними наземних спостережень за температурою повітря та даними космічних зйомок

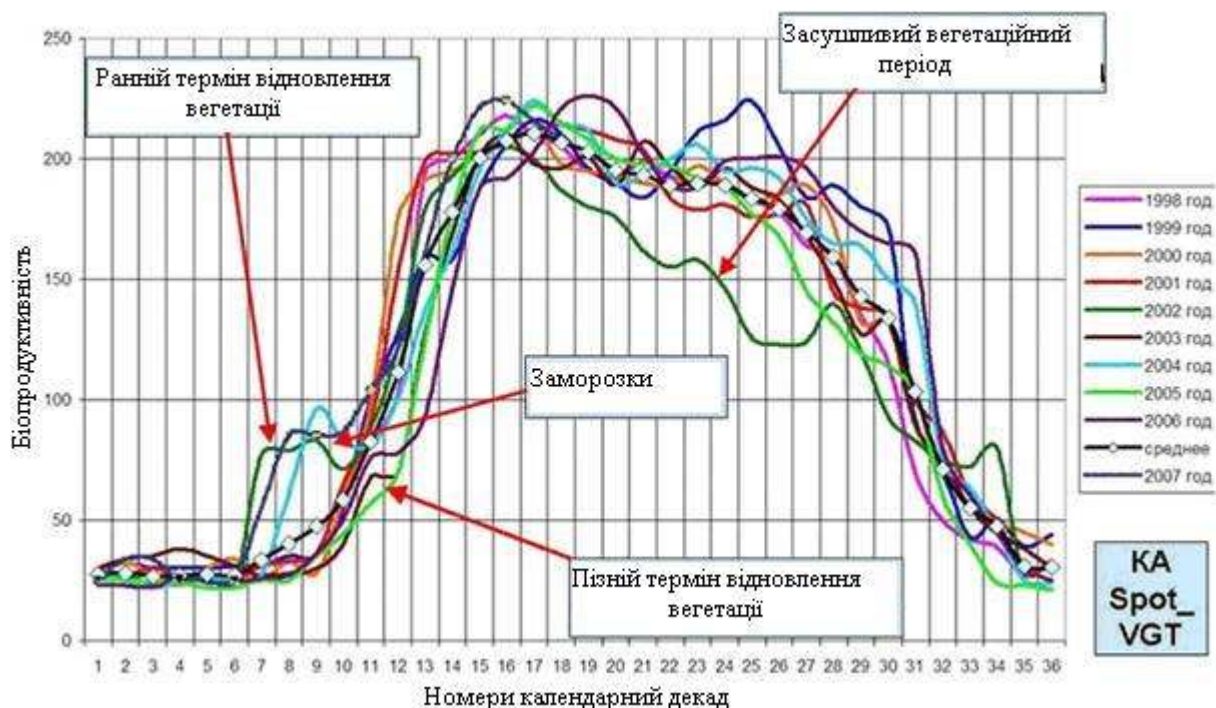


Рис. 8.8 – Погодні умови, що формують динаміку біопродуктивності сільськогосподарських посівів-аналогів

8.5 Тематичне дешифрування факторів (Блок 12)

Методичною основою виконання робіт з агрокосмічного моніторингу (дистанційні спостереження) служать головні фізичні показники взаємодії електромагнітних випромінювань із об'єктами підстильної поверхні, спостережувані при прямих вимірах за допомогою супутникових зйомок:

- нормалізований вегетаційний індекс (синтезування каналів видимого діапазону);
- альbedo ґрунтово-рослинного покриву (зйомки у видимому діапазоні);
- власне теплове випромінювання ґрунтово-рослинного покриву (теплові зйомки);
- мікрохвильове альbedo ґрунтів (радіолокаційні зйомки);
- мікрохвильове альbedo рослинного покриву (радіолокаційні зйомки).

Основні **технологічні методи**, застосовувані при дешифруванні знімків:

- 1) Метод космобіоіндикації;
- 2) Космобіокліматичний метод;
- 3) Метод термобіоіндикації;
- 4) Метод аналогій;

- 5) Метод генералізації;
- 6) Метод моделювання.

Для вивчення по супутникових знімках стану об'єктів навколишнього середовища, оператору–дешифрувальнику, насамперед, необхідно засвоїти основні фізичні принципи механізму формування зображень об'єктів моніторингового контролю на супутникових знімках, а також знати наземний механізм формування просторово-часової мінливості контрольованих параметрів. У силу цих обставин оператор–дешифровщик знімків у задачах агрокосмічного моніторингу повинен мати дві спеціальності, одна з яких – агроном.

Основні положення **механізму формування зображень** ґрунтового-рослинного покриву на космічних знімках Землі наступні:

Зображення ґрунту в оптичному діапазоні.

Вміст у ґрунті гумусових сполук викликає зниження яскравих характеристик знімка у видимому діапазоні. Більш гумусні ґрунти виглядають на знімку більш темними.

Збільшення вмісту в ґрунті світлофарбованих мінеральних сполук приводить до зростання яскравісних характеристик знімка. Збільшення вмісту в ґрунті глинистих часток також приводить до збільшення яскравості на знімку.

Такі явища добре спостерігаються:

- при яскраво виражених ерозійних процесах;
- незадовільній рекультивації ґрунтів (або відсутністю такої) після розробки ґрунту при прокладці підземних трубопроводів, будівництві колекторно-дренажної мережі;
- оранці зольників у районах прадавніх поселень і земель, що були колись під забудовою;
- оранці земель із підґрунтовими глинами, що близько залягають (на малопотужних ґрунтах).

Яскравість у видимій області рівномірно убуває при зростанні вологості поверхневого шару ґрунту від гігроскопічної до повної вологоємності. При цьому відбувається зниження яскравості в 1,5... 3 рази. У близькій ІЧ-області також відзначається зниження яскравості при зростанні вологості ґрунту у зв'язку з поглинанням випромінювання в характерних для води смугах поглинання.

Такі явища добре спостерігаються:

- під час поливів;
- після випадання дощів;
- на підтоплених ділянках поля.

Формування зображень рослин в оптичному діапазоні.

У видимому діапазоні головну роль у формуванні зображення на супутниковому знімку відіграє поглинання світла пігментами, у першу чергу хлорофілом, який має дві головні смуги поглинання 430...450 нм,

640...660 нм. У близькому ІЧ-діапазоні основну роль відіграє поглинання світла водою, що втримується в листях. Смуги поглинання водою в близькому ІЧ-діапазоні припадають на наступні довжини хвиль: 960 і 1100 нм (більш слабкі); у середньому ІЧ-діапазоні – 1,4, 1,9, і 2,7 мкм (більш сильні). При зменшенні вмісту води в листях збільшується яскравість на знімку в смугах поглинання близького ІЧ-діапазону. Це збільшення яскравості особливо помітно при вологовмісті листя менш 80%. У видимому діапазоні такої залежності не виявлене. У спектральному інтервалі 800...1100 нм яскравість рослинного покриття на знімку зростає при збільшенні числа шарів листя, тобто чим більше величина проективного покриття ґрунту, тем яскравіше виглядає рослинний покрив на космічному знімку в смузі 800...1100 нм. Це явище широко використовується в дешифруванні на підставі розрахунків синтезованого каналу „вегетаційний індекс”.

Формування зображень ґрунту в ІЧ-діапазоні.

Яскравість зображення на супутникових знімках ґрунту в основному залежить від вологості ґрунту і її температури.

Залежність яскравості від вологості аналогічна розглянутій вище залежності в близькому ІЧ-діапазоні, але тільки з більш динамічною й контрастною зміною при збільшенні вологості, через більш високі показники поглинання випромінювання водою в розглянутому спектральному інтервалі: чим вологіше, тим темніше.

Такі явища добре спостерігаються під час поверхневих зволожений території.

Залежність яскравості зображення від температури проявляється за принципом: чим тепліше, тим яскравіше. Виключення становлять знімки із супутників NOAA, які надають в ІЧ-діапазоні зворотну картину.

Такі явища добре спостерігаються на оранці.

У денний час у діапазоні 3...5 мкм відбите сонячне та власне теплове випромінювання ґрунту перебувають у близьких співвідношеннях, що може вносити значні перешкоди в інтерпретацію яскравісних характеристик знімка. Тому в діапазоні 3...5 мкм краще знімати вночі. У цей час на знімку дуже добре відображаються місця перезволожений ґрунту, особливо пов'язані з фільтраційними витоками, незадовільною роботою дренажної мережі.

Формування зображень рослин в ІЧ-діапазоні.

Одним із двох основних факторів, що впливають на відбивні та випромінювальні характеристики фітоелементів, є вологовміст. На космічних знімках рослинного покриття в ІЧ-діапазоні рослини з високим вологовмістом темні. При зниженні вологовмісту рослини на знімках світлішають. Більш значним фактором, що впливає на інтенсивність власного випромінювання рослинного покриття, є його термодинамічна температура. Спостереження за цим фактором має велике значення при

виявленні дефіцитів вологозабезпеченості, захворювань рослин, поразки їх шкідниками, отрутохімікатами та ін. Ці причини викликають зниження транспіраційних можливостей рослин, у зв'язку із чим у полуденний час такі рослини зазнають перегріву на 10-12 градусів вище температури повітря і фіксуються на знімках, як теплові аномалії. Це явище використовується при дешифруванні на підставі розрахунків синтезованого каналу „термоіндекс”.

Формування зображень ґрунту в мікрохвильовому діапазоні.

Величина яскравісних характеристик космічних знімків ґрунту в мікрохвильовому діапазоні в основному залежить від вологості ґрунту і її шорсткості. Вологі ґрунти виглядають на знімках більш світлими, ніж сухі. Поорані ґрунти також більш світлі, ніж незорані. Моніторингові спостереження легко дозволяють визначити ту або іншу причину яскравих ґрунтів на знімку.

Глибина проникнення НВЧ (мікрохвильового) випромінювання в ґрунт, а, отже, товщина шару, що формує відбитий потік НВЧ-випромінювання, збільшується зі зменшенням вологості ґрунтів і зі збільшенням довжини хвилі. Установка на космічному апараті групи випромінюючих радіолокаторів з різною довжиною хвилі випромінювання дозволяє робити пошарове (по типу томографа) зондування вологовмісту в ґрунті. Максимальна глибина проникнення радіохвиль під поверхню ґрунту характерна для легких ґрунтів регіону.

Формування зображень рослин у мікрохвильовому діапазоні.

Цей діапазон з урахуванням несприятливого режиму хмарності в регіоні є пріоритетним і перспективним в аерокосмічному моніторингу. Величина яскравісних характеристик космічних знімків рослинності при активному способі зондування в мікрохвильовому діапазоні в основному залежить від величини проективного покриття ґрунту. Чим більше проективне покриття, тем яскравіше тон знімка. Моніторингові всепогодні спостереження за динамікою біомаси надають можливість одержувати інтегральні криві її нагромадження, характер яких дозволяє оцінювати інтенсивність нагромадження біомаси на різних рівнях розвитку рослин і виявляти фактори, що впливають на біопродуктивність рослинного покриву. У зв'язку з відсутністю достатнього практичного досвіду у використанні цього діапазону випромінювання для аналізу стану рослинного покриву значно підвищується значимість полігонних спостережень.

Окремі результати тематичного дешифрування, а також вирішення агромоніторингових задач можна представити на прикладі вирішення наведених нижче задач.

8.5.1 Установлення залежності між середньою врожайністю ранніх зернових і біопродуктивністю полігона

Одним з варіантів прогнозування регіональної врожайності ранніх зернових є варіант, заснований на виконанні космічного моніторингу біопродуктивності природних космобіоіндикаторів по даним малого геометричного відрізнення космічного апарата (КА) SPOT. На рис. 8.9 наведений приклад зв'язку середньої врожайності ранніх зернових у регіоні з біопродуктивністю лугової рослинності на тестовій ділянці за багаторічними даними КА SPOT.

Набір таких регіональних базових залежностей на основі використання космобіоіндикаторних полігонів у сукупності з оперативними моніторинговими космознімками дозволяє в регіоні прогнозувати врожаї ранніх зернових культур.

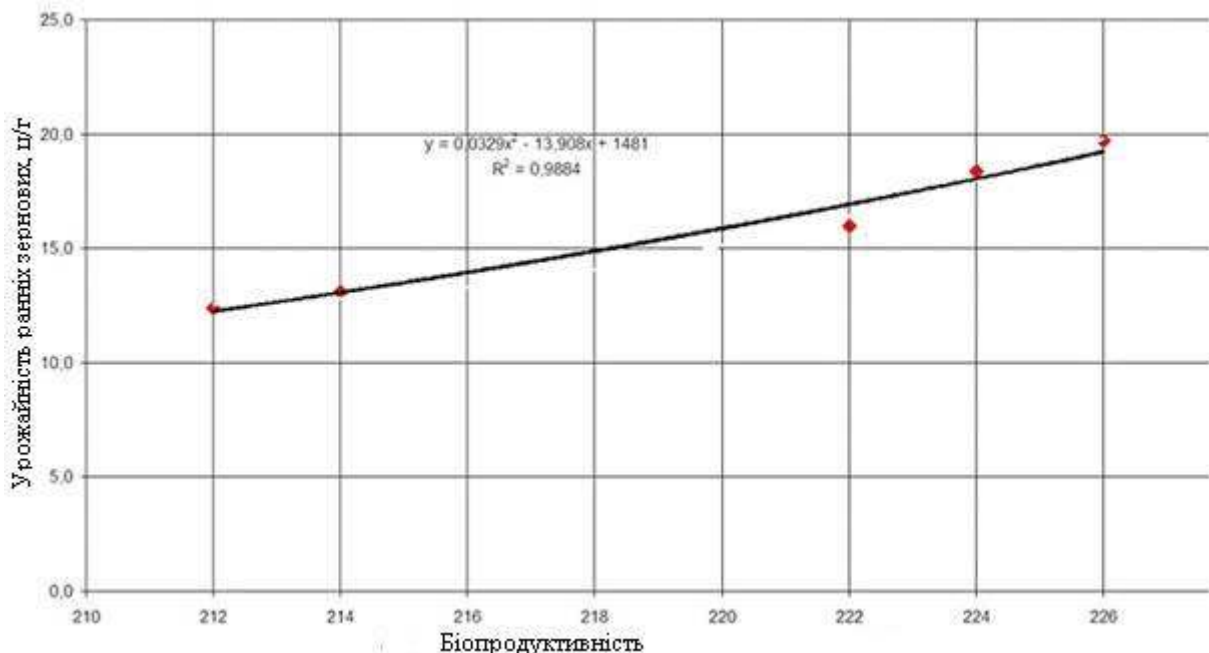


Рис. 8.9 – Зв'язок середньої врожайності ранніх зернових у регіоні з біопродуктивністю тестової ділянки за багаторічними даними КА SPOT

Технологічний ланцюжок операцій, виконуваних фахівцем-аналітиком для прогнозування врожаю та строків збирання за місяць до збирання, описується в такий спосіб:

- у режимі вільного доступу одержують нормалізовані космічні знімки для побудови в регіоні бази даних кривих біопродуктивності природних космобіоіндикаторів подекадно;
- по отриманих кривих будують еталонні середньобагаторічні криві біопродуктивності основних регіональних фітоценозів;
- визначають залежність середньої врожайності ранніх зернових у

- регіоні з максимальними (піковими) значеннями „вегетаційного індексу” на кривих біопродуктивності космобіоіндикаторів в рамках вегетаційного періоду ранніх зернових за відповідні роки;
- г) динаміка поточної кривої біопродуктивності космобіоіндикатора в порівнянні з еталонної щомісячно дозволяє прогнозувати відхилення врожайності поточного року від середньобагаторічного;
 - д) остаточний прогноз урожайності за місяць до збирання можна скласти після одержання пікового значення біопродуктивності космобіоіндикатора та розрахунків урожайності згідно отриманого пікового значення по раніше отриманих зв'язках;
 - е) строк настання пікових значень по „вегетаційному індексу” у порівнянні з еталонним роком дає уявлення про настання строку збирання цього року, що дає підстави більш успішно підготуватися до збору врожаю.

8.5.2 Визначення складу сільськогосподарських культур і калібрування врожайності ранніх зернових по окремих полях

Завдання зважується на підставі виконання каліброваних робіт з локального агрополігону. Приклад розпізнавання сільськогосподарських культур по тематичній палітрі наведений на рис. 8.10 за даними космічних знімків з КА LANDSAT-5. Приклад калібрування врожайності ранніх зернових по полю наведений на рис. 8.11 за наземним даними з полів тематичного полігону в сукупності з результатами космічної зйомки з КА LANDSAT-5 від 14 червня 2007 року.



Рис. 8.10 - Приклад розпізнавання сільськогосподарських культур по тематичній палітрі

Побудова тестових кривих для розпізнавання сільськогосподарських культур і прогнозу врожайності в локальному масштабі виконується на підставі аналізу багаторічної динаміки космобіопродуктивності основних сільськогосподарських культур регіону. За результатами цього ж аналізу розробляється календар агрокосмічного моніторингу.

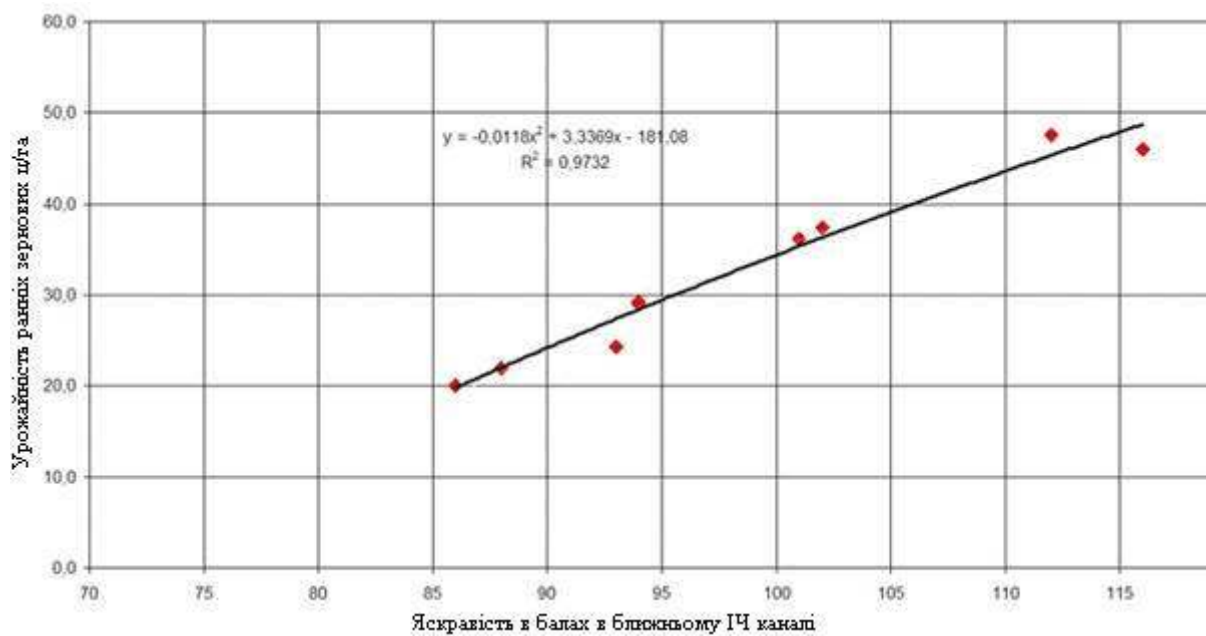


Рис. 8.11 – Калібрування врожайності ранніх зернових на полях полігона за результатами космічної зйомки з KA LANDSAT-5

8.5.3 Вивчення інформативних властивостей панхроматичного каналу космічного апарата Ресурс ДК1

Подібні експерименти необхідно проводити постійно для уточнення інформативних властивостей знімків. Знімок отриманий з КА Ресурс ДК1 23 липня 2008 року. Розміщення тестових ділянок полігона показане на космоплані (рис. 8.2).

Поле 1В (рис. 8.12)

На дату зйомки підстильна поверхня поля 1В являла собою чисту пару, без рослинного покриву. Для такого типу поверхні найбільше інформативна смуга 0,5...0,6 мкм або панхроматичний діапазон. У цьому випадку представлена унікальна можливість дистанційно проаналізувати стан чистого ґрунтового покриву: його потужність, механічний склад підґрунтових ґрунтів, гумусованість верхніх шарів ґрунту та технологію обробки ґрунту. Темні плями на знімку, за винятком тіней від лісосмуг (час зйомки – 16 годин) указують на ділянки поля з найбільшою гумусовмісткістю і потужністю ґрунтового шару більше 27...30 см. Світлі

плями вказують на ділянки поля з глинистими підґрунтовими ґрунтами, що близько залягають (менш 25...27 см від поверхні) і які піднімаються на поверхню при оранці. Поздовжні смуги говорять про свально-розвальне формування ґрунтів при оранці (розвал у місці знаходження смуги) і напрямку оранки. Інформативність знімка по розглянутій тематиці дуже висока у зв'язку з високим геометричним відрізненням (не гірше 2-х метрів) а також високим (16 біт) радіояскравісним відрізненням, що безсумнівно є однією з головних переваг апаратури КА Ресурс ДК1 у даній тематиці дешифрування.

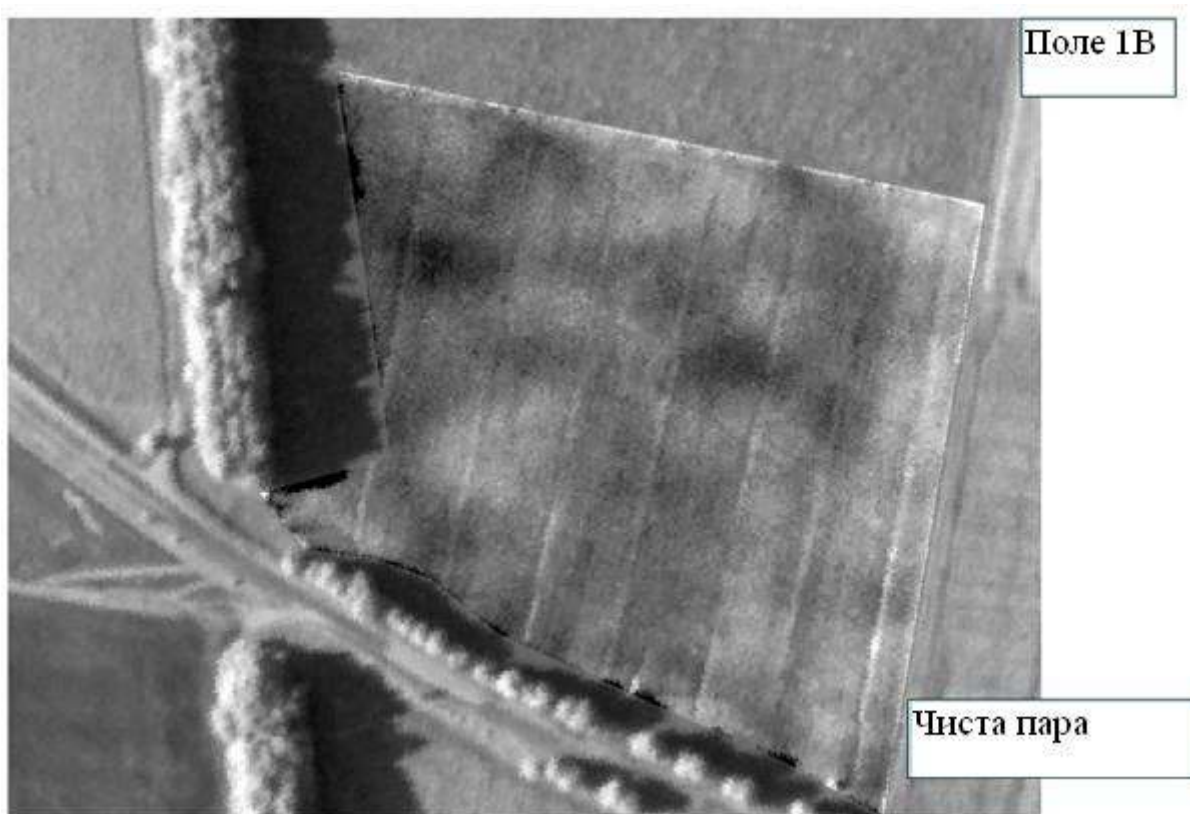


Рис. 8.12 – Поле 1В (тестова ділянка)

Поле 2А (рис. 8.13)

На дату зйомки підстильна поверхня поля 2А складалася із двох рівновеликих ділянок і являла собою два типи рослинного покриву: картопля (ліворуч) і озимий ячмінь (праворуч). Такий тип поверхні найкраще аналізувати по космічних знімках з використанням так званого „вегетаційного індексу”. На жаль, апаратура КА Ресурс ДК 1 не має смуги близького інфрачервоного діапазону. Що не дозволяє по знімках цього КА синтезувати зображення у вегетаційному індексі і є одним з головних недоліків апаратури КА. Однак, високі інформативні якості панхроматичного режиму (високе геометричне відрізнення, а також високе (16 біт) радіояскравісне відрізнення) дозволяють у значній мірі

компенсувати зазначений недолік. У цьому випадку представлена можливість дистанційно проаналізувати стан рослинного покриву: його ступінь однорідності, ступінь полягання і визначити попередні культури. Рослинний покрив першої ділянки (ліворуч) являє собою картопля. Темні плями на ділянці вказують на місця в поле із залишками попередника (люцерни).

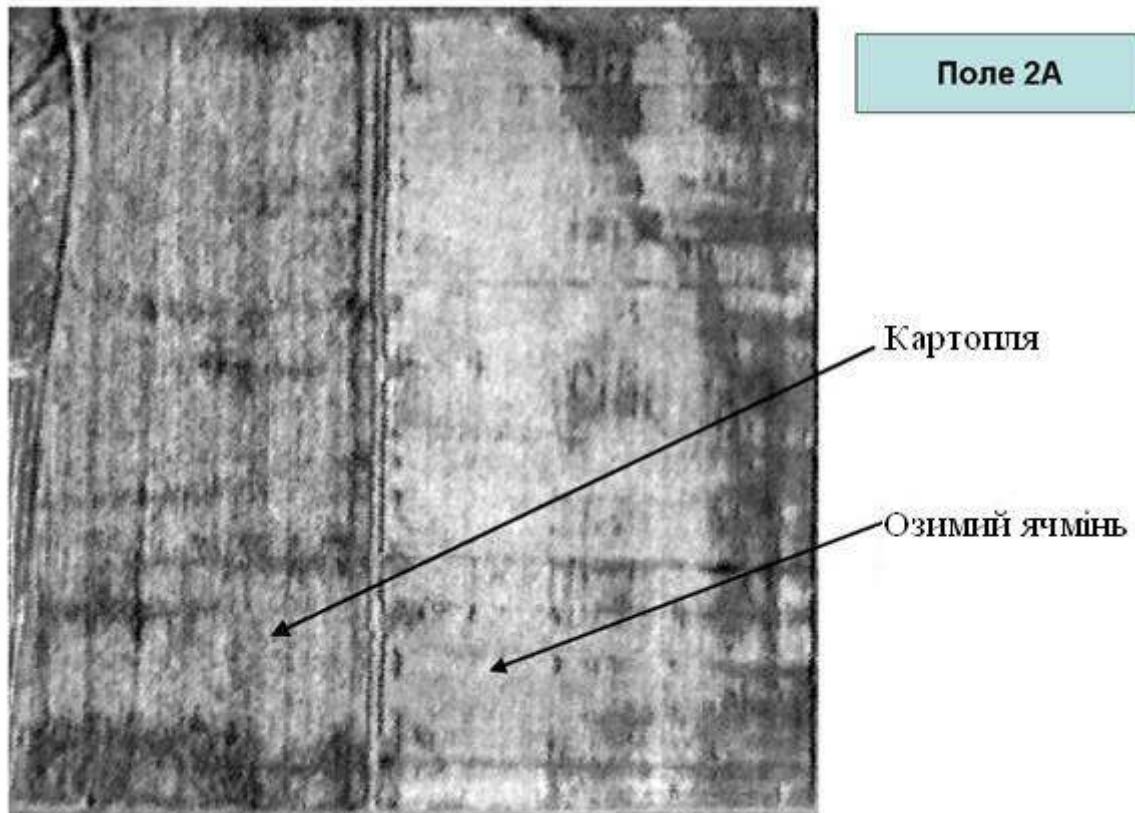


Рис. 8.13 – Поле 2А (тестова ділянка)

Рослинний покрив іншої ділянки (праворуч) являє собою озимий ячмінь. Світлі тони вказують на місця полеглого ячменя. Основною причиною значного полягання посіву є несприятливі погодні умови. Несприятливість погодних умов полягає у випаданні на початку липня значної кількості атмосферних опадів (з 3-го по 6 липня випало 90 мм дощу), що сприяло надмірному засвоєнню ячменем внесених під нинішній урожай добрив, а також добрив, що були раніше і зниженню із цієї причини стійкості рослин до полягання.

Поле 3Д (рис. 8.14)

На дату зйомки підстильна поверхня поля 3Д являє собою один тип ґрунтово-рослинного покриву: картопля.

Рослинний тип підстильної поверхні найкраще аналізувати з використанням так званого „вегетаційного індексу”. Однак, високі інформативні якості панхроматичного режиму (високе геометричне

відрізнєння, а також високе (16 біт) радіояскравісне відрізнєння) дозволяють у значній мірі компенсувати відсутність такої можливості для зйомок з КА Ресурс ДК1.

У даному завданні представлена можливість дистанційно в панхроматичному діапазоні розпізнати на знімку не тільки сільськогосподарську культуру, але й розділити її по сортах.

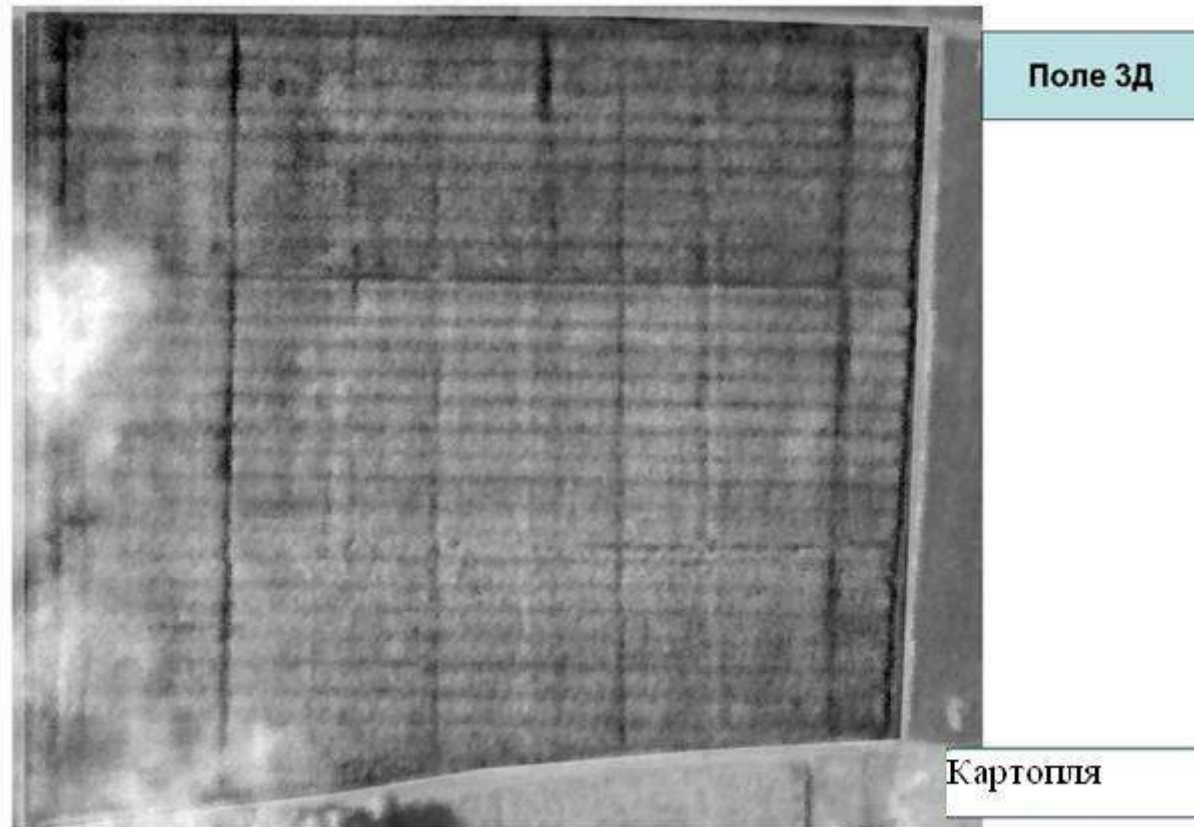


Рис. 8.14 – Поле 3Д (тестова ділянка)

Розпізнавання сільськогосподарської культури ґрунтується на аналізі текстури зображення. Текстура зображення (перетинання поздовжніх і поперечних смуг) характерна для технології оброблення картоплі. Спочатку при оранці уздовж границь поля утворюються характерні розвальні смуги. При посадці картоплі борозни нарізуються поперек оранці і відбиваються на знімку у вигляді поперечних смуг.

На знімку чітко виділяється геометрично правильна різнорідність картоплі по біомасі (більш темний тон у панхромі характеризує більшу біомасу), що вказує в цьому випадку на різносортність. Картопля, що виділяється більш темним тоном, відноситься до сорту „Єлизавета”, що представляє ранні сорти картоплі (відповідно, вегетативно більш розвинені на дату зйомки). Інший сорт картоплі – „Удача”.

Поле 5Д (рис. 8.15)

На всьому полі перебуває озима пшениця сорту Московська 39.

Відмінність у попередниках: на ділянці ліворуч попередником є пара; на ділянці праворуч – гречка. Як видно, різні попередники сформували різну стійкість пшениці до полягання. На ділянці ліворуч, як і на більшості таких ділянок (озима пшениця після пари) відзначається інтенсивне полягання. У той же час, зовсім не відзначене полягання на ділянці озима пшениця після гречки.



Поле 5Д, озима пшениця

Рис. 8.15 – Поле 5Д (тестова ділянка)

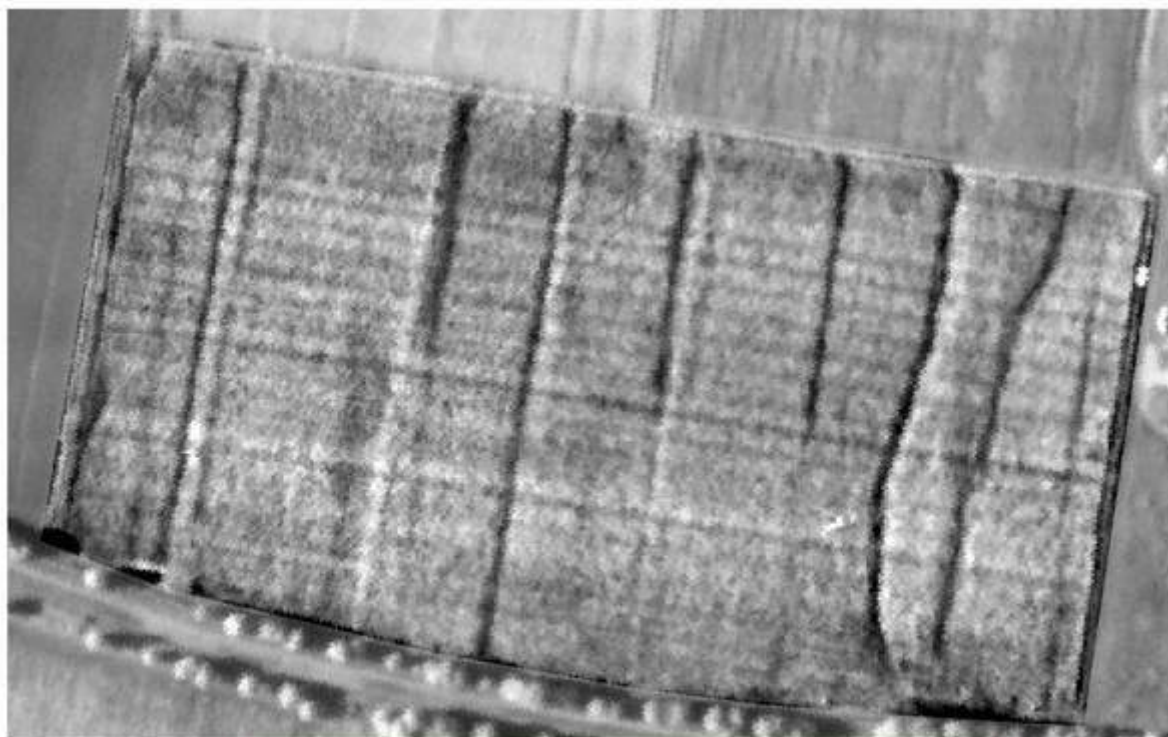
Біологічна врожайність озимої пшениці в цілому на поле досить висока (близько 50 ц/га). На це вказує відносно темний тон панхроматичного каналу в місцях не полеглого посіву. Фактична врожайність у підсумку склала 31,0 ц/га, що є наслідком втрат (близько 40%) при збиранні полеглих хлібів.

Поле 6В (рис. 8.16)

На дату зйомки підстильна поверхня поля 6В являє собою один тип ґрунтового-рослинного покритву: картопля.

Розпізнавання сільськогосподарської культури ґрунтується на аналізі текстури зображення. Текстура зображення (перетинання поздовжніх і поперечних смуг) характерна для технології оброблення картоплі. Спочатку при оранці уздовж границь поля утворюються характерні розвальні смуги. При посадці картоплі борозни нарізуються поперек оранці та відбиваються на знімку у вигляді поперечних смуг. Знімок наочно відображає ерозійні процеси, що відбуваються на полі при

несприятливих погодних умовах.



Поле 6Д, картопля

Рис. 8.16 – Поле 6В (тестова ділянка)

Зокрема, цього року на початку червня пройшли зливові дощі, які зробили значні розмиви картоплі на цій полі. На початку липня також випадала підвищена кількість атмосферних опадів.

Поле 9А (рис. 8.17)

По характеру підстильного покриву поле 9А складається із двох ділянок: чиста пара та озима пшениця. Ділянка озимої пшениці у свою чергу розбивається на дві ділянки, у зв'язку з різними попередниками: середня ділянка поля має попередником конюшину, а нижня ділянка поля має попередником чистий пар.

Як і в раніше розглянутих ділянках чистих парів, ділянка чистого пару поля 9А має по знімкові аналогічні інформативні показники, що наочно характеризують можливості панхроматичного каналу високого геометричного і яскравісного відрізнення найбільш достовірним способом визначати строкатість родючості поля.

По стану озимої пшениці з урахуванням попередніх аналізів можна прийти до висновку, що в аналогічних погодних умовах стійкість озимих зернових до полягання знижується, якщо попередником посіву озимих є пари. Ми практично не спостерігаємо цього року істотного полягання озимих на інших попередниках.

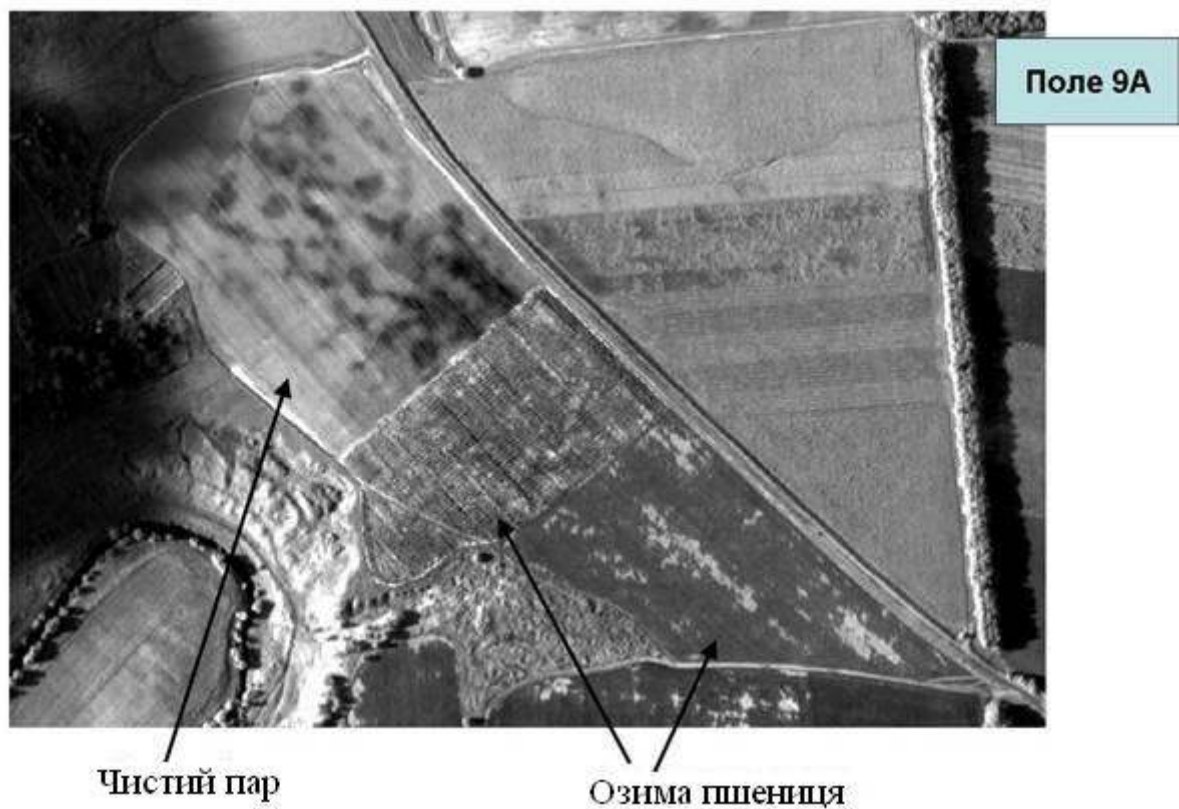


Рис. 8.17 – Поле 9А (тестова ділянка)

8.6 Моделювання врожайності (Блок 13)

Як показав проведений аналіз можливостей створення для системи агрокосмічного моніторингу посівів сільськогосподарських культур „банку знань”, вирішення проблеми створення такого банку вимагає розробки спеціальної концепції з урахуванням великої кількості вимог до його функціонування.

Однією з найбільш важливих складових частин інформаційної системи агрокосмічного моніторингу є підсистема прогнозу розвитку та оцінки стану антропогенних екосистем. Ця підсистема повинна містити в собі банк імітаційних динамічних і динаміко-статистичних моделей розвитку екосистем, методів прогнозу врожайності та оцінки стану посівів і ін. Як показав проведений аналіз існуючих традиційних методів прогнозу та динамічних моделей продуктивності посівів, більшість із них орієнтована на нестандартну, дуже специфічну вхідну інформацію, яку одержати дистанційними та стандартними методами спостережень досить проблематично. Тому головним критерієм розробки методів прогнозів розвитку та функціонування антропогенних рослинних екосистем (крім вірогідності та виправданості прогнозу) повинна бути надана можливість використання при розробці моделей біопродуктивності дистанційно одержуваної інформації про стан рослин і навколишнього середовища. На

доказ цієї тези можна привести приклад порівняння вірогідності результатів інформаційних біокліматичних систем, розроблених на основі старих емпіричних способів і тих же самих систем, у яких динаміка біопродуктивності посівів фіксується більш об'єктивними методами дистанційного зондування. При цьому сучасний метод розробки інформаційної системи по праву можна назвати космобіокліматичним.

Непрямий вимір біокліматичних характеристик рослинності можливий шляхом одержання кореляційних зв'язків штучного безрозмірного показника космічного знімка „вегетаційний індекс” з наступними параметрами: „проективне покриття”, урожайність, вологозабезпеченість рослин і ін.

Деякі із цих параметрів при відсутності можливості прямого виміру передбачається одержувати шляхом розрахунків на самостійно розроблених експериментальних моделях.

Прикладом однієї з таких моделей – ґрунтово-гідрологічної є розроблена В.М. Тимохіним комп'ютерна програма ІКМО, по якій можливо в першому наближенні оцінювати водоспоживання сільськогосподарських культур. В основі розрахунків лежить рівняння водного балансу зони аерації:

$$D = d + E - x - m - k, \quad (8.1)$$

де D – дефіцит вологозабезпеченості сільгоспкультури, мм; d – вихідний дефіцит вологозабезпеченості, мм; E – сумарне випаровування, мм; x – атмосферні опади, мм; m – поливна норма, мм; k – підживлення від ґрунтових вод, мм.

У цей час за програмою ІКМО можна розраховувати такі параметри: дефіцит вологозабезпеченості ґрунту, сумарне випаровування, підживлення від ґрунтових вод, інфільтрацію на ґрунтові води, зниження врожайності у зв'язку з недостатньою вологозабезпеченістю рослин.

8.7 Апаратно-програмні засоби обробки інформації дистанційного зондування Землі (Блок 14)

Сутність щоденної роботи оператора агрокосмічного моніторингу на робочому місці „Експерт-6” в основному полягає в наступному:

- регулярний пошук і додавання до існуючих баз даних космічних знімків різного геометричного відрізнення, що дозволяють у режимі вільного доступу одержати необхідну просторово-часову інформацію;
- при виникненні умов чистого неба аналіз можливостей проведення космічної зйомки актуальними космічними апаратами і оформлення замовлення знімків по адресах відповідних баз

- даних;
- щоденне одержання необхідних знімків і опорно-априорної інформації з мережі Інтернет з розміщенням отриманої інформації в 21-ній папці даних; знімки з КА NOAA (15, 17, 18, 19), близько 6 знімків у добу, у режимі реального часу (із затримкою на 2 години) з бази даних Інституту космічних досліджень; знімки з КА „Метеосат-8”, чотири знімки в добу з бази даних Ferdinand Falk; знімки з КА „Метеосат-8” з бази даних EUMETSAT у режимі реального часу (із затримкою на годину), у мультирежимі (24 знімка в ролику), з часовою дискретністю в 15 хвилин по наступній тематиці: просторово-часовий розподіл і інтенсивність атмосферних опадів; просторово-часова динаміка повітряних мас із розподілом по висоті та температурі; просторово-часова динаміка пилових атмосферних потоків; просторово-часова динаміка вогнищ великих загорянь; знімки з КА „Метеосат-8” з бази даних Met Office у режимі реального часу (із затримкою на годину), у мультирежимі (24 знімка в ролику), з часовою дискретністю в 1 годину, у тепловому каналі спектра; одержання з бази даних COLA результатів короткострокових (щодня, на тиждень уперед) прогнозів агрометеорологічних умов (тепловий і водний ресурси, вітровий режим); одержання космокарт просторово-часового снігового покриття суші та льодового покриття відкритої водної поверхні; супутникові синоптичні карти із прогнозом розвитку метеовимог на п'ять днів вперед, з бази даних європейських країн НАТО; поточні метеодані по найближчих метеостанціях;
 - щодакне одержання знімків з бази даних VEGETATION у форматі вегетаційний індекс;
 - щомісячне одержання з бази даних Met Office результатів довгострокових (щомісячно, на три місяці вперед) прогнозів агрометеорологічних умов (тепловий і водний ресурси);
 - одержання радіолокаційних знімків з КА „Метеор М” у режимі реального часу через персональну станцію приймання супутникової інформації „КОСМЕК”;
 - відбір знімків і виділення дат по факторі прозорості атмосфери;
 - геометрична корекція знімків;
 - розрахунки вегетаційного індексу по багатоканальних знімках;
 - розрахунки термоіндекса по знімках з КА NOAA, Landsat;
 - одержання необхідної опорної інформації з полігона;
 - тематичне дешифрування знімків;
 - одержання різного роду залежностей яскравісних показників знімків від факторів, що формують урожайність

сільськогосподарських культур (побудова моделей).

Обробка даних ДЗЗ містить у собі наступні попередні операції:

- усунення збійних рядків у зображенні, проведення радіометричної корекції;
- проведення геометричної прив'язки за навігаційними даними і (або) опорним точкам на місцевості (карті);
- приведення знімка до заданої картографічної проекції;
- створення мозаїк з декількох знімків на територію, що цікавить;
- поліпшення якості знімка і його інформативних властивостей, фільтрація, синтезування та ін.
- визначення кола тематичних задач, виділення зон інтересу та тематичне дешифрування.

Результати обробки зберігаються на робочому місці як на жорсткому диску для оперативної роботи, так і на CD ROM (RW, DVD) для тривалого зберігання.

Придбане ліцензійне або розроблене власними силами прикладне програмне забезпечення повинне передбачати підтримку різних сторін обробки отриманих супутникових знімків, починаючи від відкриття пакета, виконання операцій по нормалізації знімків і закінчуючи підготовкою необхідного тематичного матеріалу, отриманого за допомогою графічних редакторів. Крім того, програмне забезпечення повинне допомагати одержувати додаткову до супутникових знімків інформацію, що характеризує стан досліджуваного об'єкта, необхідну при тематичному дешифруванні. Така інформація може бути отримана при використанні різних математичних моделей, що описують умови формування різних режимів стану об'єктів спостережень.

Для обробки супутникових знімків застосовується наступний набір основних операцій:

- 1) Геометрична корекція знімка в задану систему географічних координат у різних картографічних проекціях на вибір (Меркаторська, Гауса-Крюгера, UTM) з можливістю збереження в типових графічних форматах (jpg, bmp, gif, tiff і ін.).
- 2) Створення мультимедійних зображень по набору різночасних знімків, наведених до єдиної системи просторових координат.
- 3) Розкладання знімка на окремі чорно-білі канали, кольорове синтезування знімка з окремих каналів.
- 4) Операції з яскравістю:

являють собою найпоширеніший вид операцій. Гістограмні перетворення (Histogramme) дозволяють адаптувати відображувані фрагменти зображення на екрані у відповідності зі статистичними характеристиками цього фрагмента (при необхідності повинне здійснюватися обчислення функції переходу від значень шириною більше 8 біт у значення шириною

8 біт);

прив'язка яскравості пікселів до відповідних параметрів (Т – температура в градусах, NDVI – вегетаційний індекс у частках одиниці та ін.), згідно наявних для кожного космічного апарата каліброваних залежностей;

побудова гістограми яскравості з показником відповідних числових величин на шкалах X, Y;

контрастування;

створення палітри з наступним збереженням. Режими розробки палітри відображуваних яскравостей (Palette) повинні дозволяти вибирати різні колірні палітри з бази даних, модифікувати їх, створювати нові палітри і записувати палітри в базу даних;

арифметичні операції зі збереженням нового зображення. Для підвищення інформативності оброблюваних зображень виникає необхідність накладати різноканальні фрагменти одного знімка на іншій або різночасні знімки, що перебувають у єдиній системі просторових координат, роблячи при цьому операції додавання, віднімання, розподілу, множення піксельних яскравостей;

усіякі види фільтрації. При обробці різночасних знімків, що перебувають у єдиній системі просторових координат, виникають утруднення з побудовою часової динаміки яскравості окремих фрагментів через наявність над об'єктами спостережень перешкод (наприклад, хмарності) під час зйомки. Доводиться відновлювати дійсну яскравість окремих пікселів на результуючому знімку, отриманому з множини знімків за певний строк зйомки. Наприклад. Мова може йти про відновлення яскравості пікселів на знімках, синтезованих по показникові NDVI (рослинний покрив). Передбачений спеціальний алгоритм, який, скануючи пікселі на різночасних знімках, на результуючому знімку яскравісне значення кожного пікселя відображає із усіх відсканованих значень яскравості максимальним значенням. Відповідно, для виконання розрахунків є можливість поставити наступне завдання: Які знімки підлягають обробці? Позначаються знімки; Результуюча величина пікселя? Максимальна, мінімальна, середня, різниця між максимальною і мінімальною;

крім завдань, пов'язаних з оцінкою стану рослинного покриву є завдання по відновленню інших параметрів (сніг, температура підстильної поверхні та ін.).

- 5) Панорамування, з визначенням місця положення фрагмента на всьому зображенні.

Ця операція передбачена на випадок, якщо розміри активного вікна менше розмірів розташованого в ньому файлу.

6) Масштабування

При цій операції в активному вікні можна збільшувати або зменшувати робоче зображення об'єкта:

З показом співвідношення вихідного зображення до екранного;

Із заданим співвідношенням вихідного зображення до екранного, з можливістю збереження нового зображення.

7) Робота з контурами (масками):

Побудова контурів:

- „малювання на екрані” контуру, як шару зі збереженням у векторній формі;
- занесення вузлових точок контуру в системі географічних координат;
- збереження контурів у бібліотеці з наступною можливістю їх пошуку і використання.

Корекція побудованих контурів (масок) шляхом натягування маски з використанням опорних точок, з можливістю панорамування маски та масштабування з наступним збереженням;

Підрахунок середньої яскравості в контурі в заданому діапазоні на окремому знімку;

Побудова яскравого профілю з показом числових величин яскравості з урахуванням напрямку профілю;

Визначення площі контуру:

- довільної конфігурації;
- геометрично правильної форми.

Контрастування з наступним збереженням зображення;

Виріз частини зображення по заданому контуру зі збереженням географічних координат;

Зшивання (склеювання) окремих фрагментів зображення єдиного об'єкта;

Автоматизоване опитування через сканування контуром (маскою) різночасних знімків з підрахунком у контурі середніх яскравостей у заданому діапазоні та виведенням окремого графіка зміни яскравості Y в часі T з апроксимацією графічного зв'язку рівнянням $Y = f(T)$.

8) Робота з лінійними об'єктами:

Підрахунок довжин ліній (прямих, кривих, периметрів, окружностей).

9) Робота із точковими об'єктами:

- визначення географічних координат у точці;

- визначення яскравості в точці;
 - складання списку відзначених курсором точок і можливістю роздруківки текстового файлу. Текстовий файл міститься в типову форму типового тематичного завдання. Наприклад: ушкодження посівів заморозком, незадовільна вологозабезпеченість сільськогосподарських культур, ушкодження рослин отрутохімікатами та ін.;
 - нанесенням точок на растр зі збереженням у бібліотеці точкових об'єктів.
- 10) Побудовою на тлі растрової картини векторного шару ізоліній по заданих параметрах із запам'ятовуванням шару та можливістю виводу на друк:
- координатної географічної сітки по заданому кроку довготи та широти;
 - ізоліній заданого параметра по заданих точках із заданим кроком;
 - ізоліній заданого параметра (NDVI, T, сумарне випаровування і ін.), розрахованим по растровій картинці із заданим кроком.
- Автоматизоване розпізнавання об'єктів:
- розпізнавання за геометричними ознаками (коло, сектор, кільце);
 - розпізнавання за текстурними ознаками (смугастість, парність, плямистість);
 - розпізнавання за яскравісними характеристиками:
- Операція по розпізнаванню об'єктів відбувається з активізацією розпізнаних об'єктів, „погашенням” помилкових в інтерактивному режимі і автоматизованим виконанням по всіх активних об'єктах операцій по:
- підрахунку площ;
 - визначенню середніх яскравостей;
 - оптимальному контрастуванню.

Одночасно з розробкою власними силами спеціалізованих програм передбачено використання існуючих ліцензійних пакетів. У цей час існують різні пакети обробки даних ДЗЗ як закордонної, так і вітчизняної розробок.

Найбільше поширення одержали такі програмні пакети обробки даних ДЗЗ як ERDAS IMAGINE (Leica Geosystems), ENVI і „Фотом од”.

Програмне забезпечення по обробці знімків з КА NOAA.

Для роботи зі знімками з КА NOAA можна використовувати програми, які наведені в табл.8.2.

Таблиця 8.2 – Програми для роботи зі знімками з КА NOAA

XV_FRAME	перегляд, географічна прив'язка і фрагментація HRPT даних
XV_GEOREF	географічна прив'язка супутникових даних і переклад їх у стандартні проекції
XV_AVHRR	обробка даних приладу AVHRR
XV_SPEC	просторовий Фур'є-аналіз зображень
XV_MULTI	сегментація та класифікація багатоканальних даних
XV_IMAGE	багатоцільова програма обробки зображень

Усе програмне забезпечення працює під управлінням середовища Microsoft Windows і відповідає всім вимогам, прийнятим у якості стандартів для додатків Windows.

Програмне забезпечення постачене розвитою системою підказок (Help), яка, крім виконання своєї основної функції – пояснення призначення клавіш і пунктів меню, може служити короткою довідковою системою з обробки супутникових даних. Це дозволяє тим споживачам, які не є професіоналами в роботі з комп'ютерами і раніше мало використовували у своїй роботі супутникові дані, швидко опанувати навичками роботи з комплексом. Таким чином, користувач може сконцентруватися на виконанні свого конкретного завдання, не вивчаючи попередньо всі технічні тонкощі і труднощі питань приймання та обробки супутникових даних.

Дане математичне забезпечення дозволяє користувачеві вирішувати широке коло завдань (на сервері SMIS можна подивитися приклади обробки, виконаної за допомогою цих програм). Особлива увага при створенні даного програмного забезпечення приділялася питанню його гнучкості та легкої модернізації. У всіх програмах є можливість створення макрокоманд для автоматизації виконання часто повторюваних ланцюжків операцій. При бажанні користувач може додатково розробити необхідні йому програми на основі спеціально для цього створених динамічних бібліотек (DLL), у які входять процедури вводу/виводу, часто використовувані діалоги, процедури обробки даних. При цьому, якщо користувач буде дотримувати досить невеликого набору правил, знову створені додатки відразу одержать можливість спілкування із уже створеними програмами. Усе це дозволяє доповнювати та модифікувати базове математичне забезпечення для вирішення конкретних задач.

Програмне забезпечення по прийманню та обробці знімків з КА NOAA у форматі APT.

Приймання та попередня обробка супутникових знімків здійснюється за допомогою трьох основних програм: Wxtrack, Wxsat, Satsignal.

Починати роботу необхідно із програми Wxtrack, яка призначена для визначення часу сеансу роботи з космічним апаратом, ідентифікації самого космічного апарата і умов зйомки (день-ніч, висота сонця над обрієм, висота космічного апарата над обрієм, територія захоплення).

Програма WXsat призначена для безпосереднього приймання й запису сигналу із супутника.

На останньому етапі для обробки знімків необхідно користуватися програмою Satsignal.

8.8 Споживачі результатів агрокосмічного моніторингу (Блок 15)

Коло потенційних споживачів продукції агрокосмічного моніторингу досить широке. На початковому етапі роботи в регіоні відібрані самі реальні споживачі супутникової інформації. Як правило, це, насамперед: природоохоронні відомства, сільськогосподарські відомства (див. табл. 8.3).

Таблиця 8.3 – Основні науково-виробничі задачі, намічувані до розв'язання в системі підсупутникового полігона та основні споживачі цих задач

Сфера навколишнього середовища, моніторинговий блок, задачі	Споживачі
1. Атмосфера	Міністерство сільського господарства Асоціація селянських (фермерських) господарств і сільськогосподарських кооперативів
1.1 Погодні умови	
1.1.1 Несприятливі погодні умови	
1.1.1.1 Штормовий вітер (напрямок, швидкість приземного вітру)	
1.1.1.2 Злива (з погрозою паводку), гроза, гради	
1.1.1.3 Пилові бури	
1.1.1.4 Ожеледь	
1.1.1.5 Заморозок	
1.1.1.6 Сильні морози	
1.1.1.7 Посуха в сухі роки	
1.1.1.8 Perezволоження в мокрі роки	
1.1.2. Агрокліматичний моніторинг	Міністерство сільського господарства Асоціація селянських (фермерських) господарств і сільськогосподарських кооперативів
1.1.2.1 Короткостроковий прогноз і оперативне коректування прогнозу по температурах повітря, а також режиму випадання атмосферних опадів під час вегетаційного періоду сільськогосподарських культур, а також під час посівної і збору.	

продовження табл. 8.3

1.1.2.2 Довгостроковий прогноз по температурах повітря, а також режиму випадання атмосферних опадів на три місяці вперед	
1.2 Забруднення атмосфери	Міжрайонна природоохоронна прокуратура
1.2.1 Контроль над просторово-часовим випаданням кислотних дощів	Асоціація селянських (фермерських) господарств і сільськогосподарських кооперативів
2. Гідросфера	Меліоводхози
2.1 Водогосподарчі гідромеліоративні об'єкти	
2.1.1 Інвентаризація та картографічне відновлення водогосподарчих об'єктів по космічних знімках	
2.1.2 Стан гребель водоймищ і ставків	
2.1.3 Моніторинг водовідвідної здатності відкритих дренажних колекторів	
2.1.4 Ефективність роботи майданного дренажу	
3. Землі	Міністерство сільського господарства
3.1 Сільськогосподарські землі	
3.1.1 Інвентаризація та картографічне відновлення території орних земель по космічних знімках	
3.1.2 Контроль над підтопленням орних земель	
3.1.3 Інвентаризація та картографічне відновлення території пасовищних угідь і сінокісних луків по космічних знімках	
3.1.4 Моніторинг деградації ґрунтово-рослинного покриву на пасовищних землях	
3.1.5 Моніторинг ярово-ерозійних процесів на орних землях	
3.1.5.1 Визначення збитку від ярово-ерозійних процесів	
3.2 Населені пункти	Органи місцевого самоврядування
3.2.1 Оцінка ефективності використання присадибних ділянок у населених пунктах за даними космічних знімків	
4. Рослинний покрив	

Контрольні запитання

1. Опишіть фактори, що впливають на структуру регіональної системи агрокосмічного моніторингу
2. Опишіть фактори, що впливають на врожайність і родючість ґрунтів
3. Опишіть апріорну інформацію, необхідну для прогнозування врожаю
4. Обґрунтуйте необхідність інформації з агрокосмічного полігону
5. Що являє собою паспорт підсупутникового тестового агрокосмічного полігону ?
6. Що являє собою календар агрокосмічного моніторингу ?
7. Які використовуються фізичні показники взаємодії електромагнітних хвиль з підстильною поверхнею для агрокосмічного моніторингу ?
8. Які технологічні прийоми застосовуються при дешифруванні об'єктів агрокосмічного моніторингу ?
9. Який механізм формування зображень ґрунтово-рослинного покриття на космічних знімках у різних діапазонах електромагнітних хвиль ?
10. Які технологічні операції виконуються при прогнозуванні врожаю та строків його збирання ?
11. Яким образом визначається склад сільськогосподарських культур і калібрується оцінка їх урожайності ?
12. Які операції застосовуються для обробки космічних знімків при агрокосмічному моніторингу ?
13. Опишіть коло споживачів агрокосмічної інформації

Література

1. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
2. Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 352 с.
3. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учебное пособие. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
4. Захаров В.М., Костко О.К., Бирич Л.Н., Крученицкий Г.М., Портасов В.С. Лазерное зондирование атмосферы из космоса / Под ред. В.М. Захарова. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 215 с.
5. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л.М. Митника, С.В. Викторова. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 244 с.
6. Герман М.А., Белов П.И., Назиров М. Лабораторный практикум по курсу: Космические методы исследования в метеорологии. – Л.: Изд. ЛПИ (ЛГМИ), 1981. – 143 с.
7. Перелигін Б.В. Одержання, передача, прийом і надання локаційної космічної інформації. – Одеса: „Екологія”, 2006. – 89 с.
8. Перелигін Б.В., Кузнichenко С.Д. Методи і засоби обробки моніторингової інформації. – Одеса: „Екологія”, 2010. – 223 с.
9. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Издательство А и Б, 1997. – 296 с.
10. Богомолов Л.А. Дешифрирование аэроснимков. – М.: Недра, 1976. – 145 с.
11. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии. / Под ред. А. Крекнела – М.: Мир, 1984. – 585 с.
12. Кривобок А.А. Использование многоспектральной спутниковой информации для идентификации посевов сельскохозяйственных культур // Труды УкрНИГМИ, вып. 248, 2000.

Навчальне видання

ПЕРЕЛИГІН Борис Вікторович

АЕРОКОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ЕКОСИСТЕМ

Конспект лекцій

Підп. до друку

Формат

Папір

Ум. друк. арк.

Тираж

Зам. №

Надруковано з готового оригінал-макету

Одеський державний екологічний університет

65016, Одеса, вул. Львівська, 15
