

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ ТА КАРТОГРАФІЇ

ЦИФРОВЕ ОБРОБЛЕННЯ ТА ДЕШИФРУВАННЯ ЗНІМКІВ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

2021

УДК 528.8(075)

Рецензенти:

к.техн.н., В.В.Білоус

к.техн.н., О.Г.Міхно

Затверджено на засіданні кафедри геодезії та картографії географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка (протокол № 5 від 16.11.2021)

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією географічного факультету (протокол № 9 від 10.12.2021 р.)

Схвалено вченою радою географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка (протокол № 5 від 14.12.2021 р.)

Автор: Т. М. Курач

Цифрове оброблення та дешифрування знімків: конспект лекцій
/ Т. М. Курач – К., 2021 – 50 с.

У конспекті лекцій викладено сучасні методи оброблення матеріалів дистанційного зондування Землі. Представлено основні відомості про методи покращення спектральних і просторових характеристик знімків. Розкриваються питання попереднього оброблення знімків із метою покращення їх спектральних характеристик і просторових характеристик, методи автоматизованого дешифрування і алгоритми проведення контрольованої та неконтрольованої класифікації знімків.

Конспект лекцій розраховано на студентів і фахівців напряму підготовки у галузі картографії, землевпорядкування, дистанційного зондування Землі. Курс лекцій читається автором на освітніх програмах «Картографія, геоінформаційні системи і дистанційне зондування» та «Геодезія та землеустрій».

УДК528.8(075)

© Т. М. Курач, 2021

ЗМІСТ

Тема 1. Цифрові знімки та їх характеристики	4
Тема 2. Рівні цифрового оброблення космознімків	16
Тема 3. Покращення якості зображення	23
Тема 4. Радіометричне коригування	35
Тема 5. Геометричне коригування	38
Тема 6. Контрольована класифікація космознімків	45
Тема 7. Неконтрольована класифікація космознімків	49
Список використаних джерел	50

Тема 1. Цифрові знімки та їх характеристики

Одним із перших застосувань цифрових зображень було передавання ілюстрацій по тихоокеанському підводному кабелю між Лондоном і Нью-Йорком на початку 20-х років ХХ ст. За допомогою друкованого пристрою виконувалось кодування вхідного зображення з подальшим його відновленням на приймаючому боці.

Результатом проведення аерокосмічного знімання є знімки в аналоговому (фотографії) та цифровому (дані на магнітних носіях або передані на приймальні станції) форматі.

Аналоговий знімок – це безперервне напівтонове зображення. Розроблені і до тепер застосовуються традиційні методи візуального дешифрування таких знімків.

Комп'ютерні способи оброблення дозволяють знімати інформацію про об'єкти з цифрового аерокосмічного знімку.

Цифровий аерокосмічний знімок – це зображення земної поверхні, у вигляді впорядкованого масиву чисел на магнітному носію, що може бути візуалізовано на екрані монітора.

Кожне з чисел на цифровому знімку відповідає певній елементарній ділянці земної поверхні та функціонально залежить від його інтегральної яскравості. На відміну від знімків у фотографічному вигляді, цифровий знімок складається з дискретних елементів зображення – пікселів, найменших елементів цифрового зображення, яскравість яких незмінна у межах цього елемента. Значення кожної растрової чарунки – кодована спектральна яскравість або фотографічна щільність. У межах піксела зображення є однорідним. Ці цифрові представлення при відображенні на екрані або друкуванні створюють зображення. Слово “піксель” є аббревіатурою англійських слів “picture element” – елемент зображення. Він позначає як найменший елемент файлового зображення, так і для позначення найменшої ділянки поверхні дисплея, дисплейний піксель. Растрові зображення представляють собою прямокутну матрицю пікселів розміром $m \times n$, що мають відповідні значення яскравості і координати.

Результат супутникового фотографування земної поверхні в одному каналі - називають **"сценою знімка"** (scene of image). Кожен знімок має таку кількість сцен, скільки спектральних каналів має сенсор. Тобто, всі сцени одного знімка - це фотографії однієї і тієї ж місцевості і одного і того ж часу, зроблені в різних спектральних каналах сенсора.

Кожним сенсором супутника зйомка поверхні проводиться в спектральних каналах (spectral bands), в яких даний сенсор налаштований проводити зйомку. Число спектральних каналів і спектральний діапазон кожного каналу - різний у різних сенсорів. Завантажуючи знімок з архіву - користувач отримує стільки окремих сцен (файлів знімка), скільки спектральних каналів має даний сенсор.

Графік спектральної кривої - графік, який показує відсоток відбитого і випущеного випромінювання для даного об'єкта протягом усього електромагнітного спектра. Характер спектральної кривої обумовлений молекулярним складом і фізичними властивостями об'єкта. Англійський термін *"spectral signature"* ввів в експлуатацію і сленгову форму цього терміна - **"сигнатура"**.

Стандартний числовий тип запису цифрових знімків – бінарний байтовий, що відповідає правилам кодування спектральної яскравості. Сенсор супутника реєструє відбите і випущене від земної поверхні електромагнітне випромінювання і зберігає цей вимір для кожного пікселя знімка в особливих одиницях - "рівнях сірого" або (англійський термін) - **Digital Number (DN)**.

Число ступенів DN залежить від кількості двійкових цифр (біт) - чисел 0 і 1, необхідних для збереження в цифровій формі максимального значення параметра. Щоб отримати число можливих ступенів - потрібно число "2" звести в ступінь необхідного числа біт: так при 6 бітах, число ступенів $2^6 = 64$, при 8 бітах (найбільш частий випадок), число ступенів $2^8 = 256$ і при 16 бітах число ступенів $2^{16} = 65536$ ступенів (наприклад, стільки ступенів мають знімки супутника Landsat 8). Сенсор фіксує в пікселі рівень сірого, виходячи з середнього показника відбитої і спрямованої енергії всіх складових типів поверхонь.

Розрядність значення пікселя визначає кількість його градацій яскравості:

- Бінарне зображення з глибиною кольору 1 біт на піксель має дві градації яскравості (чорний і білий колір);
- Непівтонове зображення з глибиною 8 біт (256 градацій сірого кольору);
- Кольорове зображення (RGB) з глибиною 24 біт (більше 16 млн. кольорових відтінків).

Отже, атрибутами цифрового знімка є:

- Оптична щільність або спектральна яскравість пікселів
- Координати пікселя
- Розмір пікселя
- Кількість розрядів кодування (глибина кольору)
- Формат і розмір файлу.

Формати даних. Цифрові знімки зберігаються в растровому форматі. На відміну від фотографічного, зображення цифрового знімка є дискретним і його копії ідентичні оригіналу. Формат, в якому зберігається файл знімка – це спосіб його представлення у пам'яті, базі даних, документі або на зовнішньому носію. Виділяють декілька груп форматів і стандартів обміну даними:

- для векторної графіки – *SHP, IGES, DXB, DXF, CGM*;
- для растрової графіки - *PCX, GIF, JPEG, TIFF*;
- для запису, обміну та передавання даних дистанційного зондування - *BIL, BIP, BSQ*.

Формат *SHP* (Shapefile) популярний векторний формат файлів для програмного забезпечення геоінформаційної системи (ГІС). Розробляється та підтримується компанією ESRI з метою сумісності даних між продуктами ESRI та стороннім програмним забезпеченням. Формат shapefile є цифровим векторним форматом для зберігання геометричних об'єктів та пов'язаної з ними атрибутивної інформації. Цей формат не має можливості зберігати топологічну інформацію. Формат шейп простий тому, що він може зберігати примітивні геометричні типи даних точок, ліній і полігонів. Цей файл містить три формати файлів:

- .shp - головний файл; містить набори геометричних об'єктів;
- .shx - індексний файл; використовується для зв'язку між файлами .dbf і .shp;
- .dbf - атрибутивний файл; містить атрибути об'єктів, описаних в .shp файлі у форматі dBase IV.

SHP-файли можуть читати і записувати 24 біти на піксель.

Формат *TIFF* (Tagged Image File Format) призначений для зберігання та інтеграції файлів растрового зображення. Основною перевагою є його широкий спектр застосування, незалежність архітектури та універсальність графічної плати. Важливою відмінністю *TIFF*-формата від більшості графічних форматів є забезпечення широкого спектру різних схем стиснення і м'яке поєднання кольорів. Теоретично можна застосовувати будь-який метод стиснення і кольоровий простір. *TIFF* формат підтримує такі кольорові моделі: Line Art (black & white); Grayscale; Pseudocolor від 1 до 8 біт (Indexed color); RGB; YCbCr; CMYK; Lab.

Для Grayscale, RGB та CMYK зображень використовується 8 біт (256 рівнів) на 1 канал, але це не є обмеженням TIFF. Специфікація також дозволяє 16-ти і 32-бітні канали, і ці можливості підтримуються більшістю сучасних програм професійної обробки зображень. **TIFF** формат відрізняється також тим, що він дає змогу застосувати гнучкий набір інформаційних полів. У цього формату є специфікація для багатьох інформаційних полів, так звані теги. Теги можуть містити як загальну інформацію про зображення, так і специфічну, наприклад, інформацію про авторські права, або теги користувачів для розміщення власних додатків конкретної інформації. У специфікації **TIFF** ці рамки для зображення заголовків називають IFD (файл-довідник) і, по суті, є гнучким набором конкретних тегів, які можуть бути використані під час написання програмного забезпечення.

TIFF підтримує велику кількість алгоритмів стиснення. А саме алгоритми стиснення без втрат:

- PackBits;
- LZW (Lempel-Ziv-Welch), широко використовується для стиснення чорно-білих та кольорових зображень (але не дуже ефективний для стиснення CMYK-даних);
- CCITT Fax group 3 та 4, в основному використовується для Line Art зображень (особливо для інформації з RIP).

Офіційно TIFF також підтримує JPEG-компресію, але зважаючи на втрати, які при цьому невідворотні, такого роду компресія не використовується для високоякісних зображень. Формат TIFF накладає обмеження на розмір файлу до 4 GB.

Формат GeoTIFF — вільний стандарт метаданих, що дозволяє записувати інформацію про координати в TIFF файли. До можливої додаткової інформації належать проекції, координатні системи, еліпсоїди, дані, і подібна інформація, необхідна для точного визначення географічних координат в файлі. Стандарт GeoTIFF повністю сумісний зі стандартом TIFF 6.0. Завдяки цьому, програмне забезпечення може відкривати і переглядати GeoTIFF файли без підтримки цього стандарту.

У тегах GeoTIFF можуть задаватися:

- вид картографічної проекції або система географічних координат;
- параметри (датум) земного геоїда;
- дискрети розрізнення зображення;
- матриця поліноміального, сплайна або афінного перетворення;
- характерні параметри зображення.

Формат IMG файлів ERDAS Imaging. Програма автоматично приписує розширення за замовчуванням під час уведення користувачем імені файлу. Для зберігання растрових даних ERDAS Imaging використовує розширення .img. Зображення можуть включати кілька цифрових шарів і охоплювати території різної протяжності. Крім графіки файли .img часто містять додаткові дані: позиції наземних опорних точок, статистику, географічні координати та іншу геопросторову інформацію. Для візуалізації збереженої в .img файлі інформації використовують утиліту Image Info IMAGING або утиліту Hfa View з меню утиліт. Кожний растровий шар у межах .img файла має свої власні допоміжні дані:

- висоту і ширину рядків і колонок;
- тип шару (безперервного або тематичного);
- тип даних (8-бітові, з плаваючою комою тощо);
- стиснення;
- розмір блока.

Дані параметри визначаються під час створення растрового шару або його імпортування до ERDAS Imaging. Для їх візуалізації використовують утиліту Image Info. Під час імпортування растрових файлів доступним є стиснення, використовуючи метод групового стиснення.

Програмне забезпечення ERDAS Imaging використовує керований фрагментарний формат tiled для зберігання растрових шарів. Растровий шар у процесі створення .img файла ділиться на фрагменти (групи). Розмір якої за замовчуванням 64×64 пікселі. Розмір групи за замовчуванням доступний для більшості додатків і не потребує зміни.

Формат запису необхідний для правильного відтворення зображення за цифровим записом. Для запису даних дистанційного зондування використовують чотири формати, які впорядковують дані зображень як:

1) **послідовність зон** (Band Sequential, BSQ). Файл починається ASCII-заголовком, що містить інформацію про дату отримання, приймальний пристрій, положення Сонця та порядок запису. Всі значення записані в першій спектральній зоні, потім у другій, третій і ін. Кожний зональний знімок знаходиться в окремому файлі, що дає можливість працювати за необхідністю зі знімками окремих зон, завантажуючи їх у будь-якому порядку.

2) **чергування зон за рядками** (Band Interleaved by Line, BIL). Зональні дані записані в один файл за рядками: перший рядок в усіх спектральних зонах, потім другий, так само третій і ін. Такий запис є зручним при аналізуванні одночасно всіх зон.

3) **чергування зон за пікселами** (Band Interleaved by Pixel, BIP). Всі зональні значення яскравості записуються для першого пікселу, потім для другого і ін. Зональні значення яскравості кожного піксела зберігаються послідовно, так званий суміщений формат. Він є зручним при виконанні попиксельного оброблення багатозональних знімків.

4) **послідовність зон зі стисненням інформації у файлі методом групового кодування**, використовують для зменшення об'єму растрової інформації. Компресія цифрових знімків направлена на згущення та зменшення об'єму інформації, яка виражається в бітах або байтах. Компресія поєднується з декомпресією – поновленням вихідного зображення. Компресія може відбуватися з втратою (JPEG, GIF – стиснення в десятки разів) та без втрати (TIFF, BMP) інформації. При компресії з втратою інформації значення яскравості однотипних ділянок усереднюються і записується одне середнє значення і число пікселів. При декомпресії деталі не поновлюються.

Перетворення даних з одного формату в інший називається конвертуванням форматів. Єдиного загальноприйнятого формату зберігання цифрових знімків не існує. Файли зображень мають додаткову інформацію, що відноситься до знімка: опис файлу даних (формат, кількість рядків та стовпчиків, розрізненість і ін.); статистичні дані (характеристики розподілу яскравостей, дисперсія); дані про картографічну проекцію. Ця додаткова інформація міститься у заголовку файлу зображення або в окремому текстовому файлі.

Властивості космознімків. Серед властивостей космознімків слід назвати наступні:

1. **Оглядовість знімків** забезпечується охопленням великих площ. При цьому значні регіони покриваються зйомкою одночасно за одних умов. У результаті є можливість проводити дослідження в глобальному і навіть планетарному масштабах.
2. **Комплексне відображення компонентів геосфери.** На знімках одночасно відображуються різні компоненти геосфери – літосфера, гідросфера, біосфера, що дозволяє вивчати їх взаємодію й взаємоз'язок.
3. **Регулярна повторюваність зйомки.** Інтервали між зйомками можуть складати роки, місяці, години, хвилини, що є важливим при організації моніторингу.

4. **Генералізація зображення** полягає в значному узагальненні зображення. Характер геометричного та тонового узагальнення рисунка залежить від ряду чинників, як технічних (масштаб, роздільна здатність знімка, метод зйомки, спектральний діапазон), так і природних (вплив атмосфери, особливості території).
5. **Об'єктивність** – кожний знімок подає портретне зображення місцевості. Підробити космознімки не можливо, знімання ведеться різними компаніями і спроби змінення даних легко відстежуються.
6. **Актуальність** – матеріали космознімання можливо отримати на різні дати і періоди, включаючи замовлення знімків.
7. **Масштабність** – сучасні засоби ДЗЗ дозволяють одночасно знімати значні за площею території з високим ступенем деталізації.
8. **Екстериторіальність** – ділянки зйомки не прив'язані до державних чи будь-яких кордонів і для проведення знімання не потрібно дозволу.
9. **Доступність** – більшість даних ДЗЗ є відкритими.

Існують два типи растру: **неперервний і тематичний**. Тематичний растр зазвичай містить пікселі, які поділені на кілька визначених категорій. Пікселі неперервного растру не поділяються на категорії, а кожен піксель має свою оригінальну характеристику. Неперервний растр можна спостерігати зокрема на необроблених знімках. Структура тематичного растру виникає після оброблення знімка і пікселі якого розбиті на певні класи, наприклад, клас водних об'єктів, населені пункти, рослинність тощо. Кожний піксель тематичного растру описується у файлі даних за допомогою однієї змінної, значення якої відносить його до того чи іншого класу. Класам надаються свої відтінки кольору. Тематичні растрові зображення отримують аналізуючи неперервні растрові дані дистанційного зондування.

Дані координатного прив'язування. Для координатного прив'язування цифрових знімків використовують дві системи координат: **растрові (файлові) координати, географічні або прямокутні координати.**

Растрові координати показують місце розташування піксела в межах зображення або файлу даних. Кожен з пікселів має координати у цифровому записі: номер рядка, номер стовпчика. Початком координат є перший лівий верхній піксель зображення, а номер рядка зростає донизу, а стовпчика – вправо. Місце пікселів також може визначатися плоскими координатами (X, Y), де X відповідають значення у стовпчиках, а Y – значення у рядках. Початком координат є лівий нижній кут.

Географічні або прямокутні координати показують положення пікселів в системі географічних координат (довгота, широта) або в плоскій системі прямокутних координат заданої проекції.

Таким чином, піксели візуалізованого на екрані монітора цифрового знімку, мають координати трьох систем – цифрового запису, просторові координати та координати екрана. У результаті проведення геометричних перетворень координати цифрового знімку можуть бути пов'язані з просторовими координатами – географічними або геодезичними, а знімок трансформований у задану проекцію.

Отримання знімків в цифровому вигляді можливо двома шляхами: при зніманні оптико-електронними знімальними системами або скануванням фотографічних знімків. Сканування виконується так званими мікроденситометрами, загалом їх називають сканерами. При скануванні важливо правильно обрати розрізненість сканування, таким чином, щоб воно відповідало розрізненості фотографічного знімка або масштабу карти яку необхідно скласти.

Характеристики знімків. Просторова розрізненність є однією з найважливіших характеристик систем дистанційного зондування, яка характеризує здатність сенсора розрізнити деталі в просторових даних.

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

Ця величина характеризує розмір найменших об'єктів, помітних на зображенні. Значення просторової розрізненності залежить від величини апертури й висоти знімання. Апертура - це діючий отвір оптичного приладу, обумовлений розмірами лінз або діафрагмами. Кутова апертура - кут L між крайніми променями кінцевого світлового пучка, що входить у систему. Розмір D найменшого елемента який спостерігається (розрізняється) на поверхні Землі залежить від величини кутової апертури L і висоти знімання H .

Застосування знімків із різною просторовою розрізненністю дає можливості:

1м

- виявлення та відображення об'єктів людської діяльності, розмір яких перевищує один квадратний метр (автомобілі, будинки, дорожні смуги, комунальне обладнання, електромережі, огорожі, окремі дерева);
- виявлення невеликих порушених ділянок на фермерських полях чи деревостанах;
- визначення та картографування прибудов та басейнів, доріг та невеликих фермерських полів;
- розмежування типів будівель та будинків для містобудування.

10м

- визначення та картографування доріг, меж майна, спортивних майданчиків, пасовищ та бічних вулиць;
- диференціація площ посівів та деревостанів за відносними вегетативними показниками здорової рослинності;
- проведення класифікацій земельних покривів малої площі.

20 – 30 м

- розміщення аеропортів, центрів міст, передмістя, торгових центрів, спортивних комплексів, великих заводів, великих лісових насаджень та великих сільськогосподарських площ;
- створення узагальнених класифікацій земельного покриву.

1 км

- оцінка вегетативних показників для держав та цілих країн;
- відстеження регіональних подій, таких як зараження комахами, посуха та опустелювання.

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

Радіометрична характеристика визначає число рівнів квантування яскравості вихідного зображення (бінарне, багатоградієнтне) і фотометричний зміст елемента зображення (одноколірне, півтонове, кольорове, спектрональне). Для позначення щільності (ступеня потемніння) елемента зображення весь діапазон півтонів від білого до чорного ділиться на $2n$ частин (2, 4, 8, ..., 256, ...), які називаються рівнями квантування. Радіометричну розрізненність зображення позначають числом біт на піксель. При формуванні бінарного (чорно-білого) зображення використовується

всього два рівня квантування, і в ньому представлені тільки білий і чорний кольори. У напівтоновому зображенні використовується 256 рівнів квантування, для подання яких в описі елемента зображення резервується 8 біт (1 байт). Чорному кольору завжди відповідає рівень 0, а білому - рівень 1 бінарного зображення і рівень 255 напівтонового.

Кольорове зображення формується з використанням тієї чи іншої палітри (RGB, CMYK і ін.), в яких колір створюється шляхом змішування основних кольорів в пропорціях, що відповідають рівням їх квантування.

Радіометрична розрізненність визначається кількістю градацій кольору які відповідають переходу від яскравості абсолютно "чорного" до абсолютно "білого". Іншими словами під радіометричною розрізненністю розуміють - число градацій кольору. Більшість сенсорів мають радіометричну розрізненність: 6 або 8 біт. 6 біт - 64 градації ($2^6 = 64$); 8 біт - 256 градацій ($2^8 = 256$). Але є сенсори й з більш високою радіометричною розрізненністю (11 біт для IKONOS і 16 біт для CORONA), що дозволяє розрізнити більше деталей в дуже яскравих або дуже темних ділянках знімка.

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

Спектральна розрізненність - це ширина спектрального каналу, до якого чутливий датчик. Спектральна розрізненність характеризує здатність системи дистанційного зондування розрізнити певні інтервали довжин хвиль. Чим вище спектральна розрізненність, тим більш вузький діапазон довжин хвиль реєструється певним каналом. При оцінці спектральної розрізненності розглядаються дві характеристики: кількість діапазонів (каналів) та ширину кожного діапазону.

Таким чином, спектральна розрізненність - це характеристика кожного каналу, а не всього знімка в цілому. Перші знімки мали один канал з дуже широким діапазоном чутливості, що охоплював видимий і частину ближнього інфрачервоного діапазону (тобто спектральна роздільна здатність становила близько 0,5 мкм). У залежності від спектральної розрізненності (кількості каналів) сенсорні системи розподіляються на:

Панхроматичні – один широкий діапазон (як правило у видимій області спектру).

Багатозональні (мультиспектральні) – від 2 до 10 діапазонів (видимий, мікрохвильовий, радіодіапазон).

Гіперспектральні – від 30 каналів і більше (як правило у видимій та ближній ІЧ-області).

Одержані сьогодні космічні знімки надзвичайно різноманітні за спектральним діапазоном знімання, за технологією одержання зображень та передаванням їх на Землю, а також в залежності від параметрів орбіти космічного носія й знімальної апаратури, що визначають масштаб знімання, оглядовість, розрізненність знімків тощо. Спектральна розрізненність панхроматичного знімку є вкрай низькою, оскільки на ньому неможливо виділити сигнали з різною довжиною хвилі, і отримане зображення характеризує відбивну здатність об'єкта в усьому видимому діапазоні. Більш висока спектральна розрізненність кольорових знімків пояснюється тим, що кольорова плівка володіє незалежною чуттєвістю в синьому, зеленому і червоному діапазонах спектру. Найбільша спектральна розрізненність у гіперспектральних знімків.

Часова розрізненність – найменший інтервал часу, через який можливе повторне знімання сцени.

Часова розрізненність визначається періодичністю збирання даних. Отримання знімків одних і тих самих ділянок земної поверхні з певною періодичністю є однією з основних областей застосування дистанційного зондування. При цьому від частоти знімання залежить можливість виявлення тих чи інших змін, які відбулися на території вивчення.

Абсолютна часова розрізненість системи дистанційного зондування визначається періодом обертання супутника навколо Землі, при якому можливе повторне знімання ділянки земної поверхні під тим же кутом огляду. Цей період може складати декілька діб. Порівнюючи знімки об'єкта за різні періоди можна спостерігати зміну його характеристик.

Програмні засоби оброблення зображень космічного спостереження. Комплексне оброблення і дешифрування знімків виконується за допомогою пакету прикладних програм - сукупність декількох програм або модулів, кожен з яких виконує спеціалізовану функцію. На сьогодні розроблено ряд універсальних професійних пакетів для оброблення даних аерокосмічного знімання: *ERDAS Imaging, ENVI, ER Mapper* і ін. (див. Додаток).

Широко застосовують програмне забезпечення для візуалізації знімків, простого оброблення та підготовки до друку: *Adobe Photoshop, Corel PHOTO-PAINT*, для створення описів і звітів - *MS Word, Word Perfect*, для кількісного аналізу знімків - *MS Excel*, для перегляду і отримання в мережі Інтернет - *Internet Explorer, Netscape*.

Системи автоматизованої обробки даних дистанційного зондування складаються з тих же основних підсистем, що й географічні інформаційні системи - введення, зберігання, обробка й подання результатів. Це сприяло їхній програмно-технологічній інтеграції з ГІС, у силу чого, для роботи з аерокосмічною інформацією в якості програмного забезпечення, використовують сучасні програмні растрові й інтегровані ГІС-пакети. Різні типи ГІС-пакетів надають користувачам різні можливості з обробки знімків, забезпечення закладеними в них програмними засобами аналізу й інтерфейсу.

Як правило, ці засоби включають деякий обов'язковий стандартний набір, по більшій частині інтерактивних, процедур попередньої корекції, трансформування й класифікації знімків із візуальним контролем їхнього виконання на екрані монітора в комплексі з іншими ГІС-технологіями. Всі розширення або модифікації цього набору призначені для рішення завдань різних рівнів складності при всебічному використанні даних дистанційного зондування. До ГІС - пакетів зі стандартними можливостями відносяться Idrisi, MultySpec, серед повнофункціональних ГІС - пакетів виділяються ERDAS IMAGINE, ENVI, ArcGIS, TNTmips, ER Mapper, ILWIS, GRASS. З точки зору можливостей цифрової обробки знімків ці пакети відрізняються в основному набором засобів операторського інтерфейсу і їхньою зручністю.

ERDAS IMAGINE (ERDAS-Laika Inc.). ГІС-пакет ERDAS IMAGINE лідирує серед використовуваних у світі програмних засобів обробки зображень. Він побудований по модульно-ієрархічному принципі, що дозволяє користувачеві придбати тільки необхідні модулі. Він складається із трьох базових наборів програм: IMAGINE Essentials, IMAGINE Advantage і IMAGINE Professional (для починаючих, підготовлених і професійних користувачів), кожний з яких містить у собі й розширює функціональні можливості попереднього набору. Ця структура програмного забезпечення базується на загальній архітектурі й має той самий інтерфейс користувача і функціональні можливості на різних комп'ютерних платформах.

Програмне забезпечення сполучить у собі функції растрової й векторної ГІС і системи обробки аерокосмічних знімків. Конфігурація IMAGINE Essentials пропонує базові засоби для візуалізації, інтерактивної корекції й кластеризації (Isodata) зображень і створення з їхнім використанням тематичних карт.

IMAGINE Advantage містить у собі всі функціональні можливості Essentials. Advantage призначений у першу чергу для тих користувачів, хто займається більше глибоким використанням даних дистанційного зондування й працює з ними регулярно. Являючи собою середній рівень конфігурації базового комплексу програмного забезпечення, IMAGINE Advantage збільшує функціональні можливості Essentials за рахунок блоку розширених функцій обробки зображення,

функцій аналізу растрової ГС із можливостями моделювання, засобів побудови поверхонь, а також ортотрансформування.

IMAGINE Professional має всі функціональні можливості Essentials і Advantage, а також додатковими можливостями по використанню алгоритмів класифікації для тематичного дешифрування й базових засобів роботи з радіолокаційними знімками.

Розширені можливості по застосуванню класифікації включають:

- можливість використання автоматизованих алгоритмів класифікації многозональних зображень для виділення майданних об'єктів при побудові тематичних карт; при цьому можуть використовуватися класифікації по обумовленій користувачем системі еталонів (класифікація по типу дискримінантного аналізу), класифікації без введення еталонів (автоматичні, по типу кластерного аналізу), а також гібридні (їхнього сполучення);
- різноманітні засоби оцінки якості, як системи еталонів (навчальних вибірок), так і отриманої тематичної карти;
- різні способи створення системи еталонів: ручне оцифрування контурів еталонних ділянок на знімку, автоматичне виділення на знімку областей із заданим ступенем внутрішньої неоднорідності, а також еталонних ділянок, що задаються майданними об'єктами на векторній карті у форматі ARC/INFO;
- оцінку ступені надійності і якості проведеної класифікації.

ENVI - програмна система (the ENvironment for Visualizing Images - *середовище візуалізації зображень*) - забезпечує всебічну візуалізацію даних і аналіз зображень будь-якого розміру й будь-якого типу.

ENVI написаний мовою IDL (Interactive Data Language - інтерактивна мова даних), ще являє собою мову структурного програмування, і забезпечує інтегровану обробку зображень.

Однією з основних переваг ENVI є його унікальний підхід до відображення процесу обробки, у якому комбінуються файлові й багатоканальні методи з інтерактивними функціями. Коли відкритий файл введення даних, каналні субфайли, що входять до його складу, зберігаються в списку, де до них можна звертатися з використанням всіх функцій системи. Якщо відкрито багато файлів, спектральні зображення різних типів можуть оброблятися як група. Група вікон змінюваного розміру на екрані дисплея ENVI складається з основного вікна зображення, вікна масштабування, і вікна прокручування.

ENVI забезпечує користувачів багатьма унікальними можливостями інтерактивного аналізу, які доступні усередині цих вікон. Широкі можливості ENVI дозволяють простими способами проводити порівняння різноканальних зображень. Програма забезпечує зв'язане просторове/спектральне профілювання багатоканальних і гіперспектральних даних у реальному часі та надає користувачам різні способи перегляду багатомірних даних. ENVI має інтерактивні інструментальні засоби для перегляду й аналізу атрибутів векторних зображень і ГС.

Зручний візуальний інтерфейс ENVI доповнюється великою бібліотекою алгоритмів обробки. ENVI включає всі основні функції обробки зображень у рамках графічного інтерфейсу користувача.

Ці функції включають перетворення даних, фільтрацію, класифікацію, реєстрацію й геометричну корекцію, інструменти спектрального аналізу, і засоби роботи з радіолокаційними зображеннями. ENVI не накладає обмежень на кількість спектральних діапазонів, які можуть бути оброблені, так що можуть використовуватися багатоспектральні або гіперспектральні масиви даних.

ENVI підтримує всебічну діалогову обробку великих багатоканальних масивів даних, екранних зображень, спектральних діаграм і бібліотек, зацікавлених ділянок зображення їх забезпеченням гнучких можливостей відображення та з географічною прив'язкою при перегляді зображення. ENVI реалізує наступні основні групи функцій роботи із зображеннями:

- базові технологічні операції роботи із зображеннями (введення-виведення, редагування, обчислення й перегляду статистики, тощо.);
- функції корекції геометричних і радіометричних спотворень відомих супутникових систем;
- загальні технології покращення зображень;
- технології спектрального (гіперспектрального) аналізу даних;
- функції інтерактивного дешифрування й класифікації;
- технології просторової прив'язки, зшивання зображень;
- обробку даних у радіодіапазоні;
- функції векторного відображення й топографічного аналізу даних;
- забезпечення великого набору картографічних проекцій;
- функції підготовки тематичних карт;
- підтримка великого числа растрових і векторних форматів даних.

ArcGIS(ESRI) - сімейство програмних продуктів, що складають цілком укомплектовану, відразу готову до роботи ГІС, засновану на загальноприйнятих галузевих стандартах. Ця інтегрована система призначена для створення, об'єднання і структурування, керування й аналізу географічних даних - тобто будь-якої інформації про просторове розташування об'єктів, явищ чи подій.

Система легко масштабується і набувається відповідно до вимог користувачів будь-якого рівня як новачків, що застосовують стандартні функції так і розробників додатків, що засновані на підтримці галузевих стандартів можливості взаємодії з іншими інформаційними технологіями дозволяють сформувати систему, оптимізовану під розроблювані проекти.

Незважаючи на загальну тенденцію до уніфікації, лінійка пропонованих ESRI програмних продуктів досить довга. Але розібратися в ній не складно, якщо розкласти їх по тріадах:

- 1) три інтегрованих кореневих додатки: ArcMap, ArcCatalog і ArcToolbox.
- 2) три настільних (ArcGIS Desktop) програмних продукти: ArcView, ArcEditor і ArcInfo, що мають однакову структуру й інтерфейс, але розрізняються по своїй функціональності. Для виконання більш глибокого аналізу даних до них можна підключити загальні додаткові модулі: ArcGIS Spatial Analyst, ArcGIS 3D Analyst, ArcGIS Geostatistical Analyst та ін.
- 3) два серверних додатки: ArcSDE, що забезпечують ефективне керування просторовими даними, і ArcIMS (разом з вьюером ArcExplorer) - унікальне рішення, призначене для надання ГІС функцій і обміну ГІС даними через Інтернет, а також ArcReader - безкоштовна програма для використання додатків для перегляду і роздруківки карт.

Модулі розширення:

ArcGIS Spatial Analyst - забезпечує широкий набір функцій просторового моделювання й аналізу, що дозволяють створювати растрові дані, будувати до них запити, вести картографування й аналіз на їхній основі. ArcGIS Spatial Analyst дозволяє також виконувати спільний аналіз векторних і растрових даних. Використовуючи даний модуль, можна одержувати інформацію про ваші дані, виявляти просторові взаємозв'язки, знаходити придатні місця розташування, обчислювати вартість переміщення з однієї точки місцевості в іншу.

ArcGIS 3D Analyst - дозволяє ефектно відобразити й ефективно аналізувати поверхні. Використовуючи 3D Analyst, можна розглядати поверхні з різних точок зору, будувати запити до поверхонь, визначати області видимості з різних точок спостереження і створювати реалістичні тривимірні зображення шляхом "накладення" растрових і векторних даних на поверхню. Ядром модуля 3D Analyst є додаток ArcScene. ArcScene забезпечує інтерфейс для перегляду шарів тривимірних даних, для побудови й аналізу поверхонь. 3D Analyst також включає ряд ГІС інструментів для тривимірного моделювання, таких як обчислення обсягу між поверхнями, видимості по лінії погляду, моделювання місцевості.

ArcGIS Geostatistical Analyst - дозволяє будувати безперервні поверхні на основі вимірів, проведених в окремих точках простору. Цей модуль дозволяє інтерполювати значення методом кригинга з високим ступенем вірогідності та включає інструменти для статистичної оцінки помилок, визначення граничних значень і ймовірного моделювання.

ArcGIS Schematics - являє собою ефективне рішення для автоматизованого створення схематичного і геосхематичного представлення об'єктів бази геоданих ArcGIS від ESRI і є додатковим модулем настільних продуктів ArcGIS.

ArcPress - призначений для виводу карт на друк. Це програмний растрезатор, що створює файли стандартних графічних обмінних форматів, а також файли керування на вбудованих мовах пристроїв даних, складні умовні позначки і великі растрові зображення, що з погляду витрат найчастіше дуже складно надрукувати на звичайних принтерах. Роль ArcPress у середовищі ГІС полягає в побудові високоякісних картографічних зображень, швидко сприйманих принтером без необхідності використання додаткової убудованої пам'яті чи додаткового апаратного забезпечення.

ArcGIS Publisher - забезпечує перетворення документів карт у форматі MXD, що дозволяє публікувати файли карт (у форматі PMF) і обмінюватися ними через локальні і глобальні мережі. Файли публікацій карт (PMF) містять інструкції про місце розташування і способах відображення шарів даних (символи, параметри відображення, масштабні залежності і т.д.), включаючи підключення до бази геоданих, до Internet та шарів географічної мережі. Друкуємі файли карт можна переглядати за допомогою вьюера ArcReader.

TNTmips (Microimages, Inc.). ГІС-пакет TNTmips має всі стандартні можливості обробки аерокосмічних знімків. Крім цього, пакет дозволяє поєднувати растрові, векторні, ГІС, CAD або TIN дані й бази даних у єдиному вікні. Пакет побудований на єдиному й однаковому для всіх обчислювальних платформ форматі даних, що входять у проект. Бази даних, створені в TNTmips або вже існуючі, можуть бути об'єднані із графічними об'єктами й використовуватися для керування параметрами відображення індивідуальних значень осередків растра, векторних або CAD об'єктів. TNTmips підтримує будь-які географічні проекції, які можуть зустрітися при роботі з даними, отриманими з різних джерел. В TNTmips передбачений збір, обробка й наочне подання статистичної інформації, що ставиться до всіх типів об'єктів, що входять у проект. Будуються гістограми, розраховуються площі, обчислюються середні значення й різні кореляційні функції. Можлива автоматична векторизація при скануванні карт.

ER Mapper (Earth Resource Mapping Ltd.) ER Mapper - пакет програм, розроблений австралійською компанією Earth Resource Mapping, що є одним з лідерів на ринку обробки даних дистанційного зондування. У пакеті ER Mapper використовується концепція алгоритмів, що дозволяють обробляти растрові зображення разом з векторними даними з ГІС і табличними даними з реляційних баз даних. Застосування динамічних зв'язків з ГІС і СУБД дозволяє оперативнo використовувати всі дані про об'єкт, незалежно від форми й формату їхнього зберігання. Пакет ER Mapper має інструмент складання й редагування анотацій до растрових,

векторних і крапкових об'єктів. Картографічні засоби, включені в пакет, забезпечують вивід зображень на широкий спектр поліграфічних пристроїв. ER Mapper поставляється у вигляді єдиного комплексу, що виключає необхідність придбання додаткових модулів. Застосування апарата "динамічних зв'язків" дозволяє поєднувати растрові зображення з векторними й табличними даними MAPINFO. Передбачено двосторонній зв'язок з даними ARC/INFO, допускається не тільки читання файлів ARC/INFO, але й коректування із середовища ER Mapper.

IDRISI (університет Кларка, США) розробляється з 1987 р. і названа на честь арабського географа й картографа XI століття Ідрісі. Пакет програм розроблений для навчання ГІС - технологіям. Цей - растровий ГІС - пакет з усіма стандартними можливостями автоматизованої обробки зображень, нетопологічним векторним поданням і обмеженими можливостями аналізу векторних даних. Дані зображень зберігаються у форматі ASCII, двійкових і упакованому двійковому форматах; кожний файл супроводжується файлом опису. Пакет містить близько 100 програмних модулів, що представляють три основні групи:

- основні модулі, що включають базові утиліти введення, зберігання, керування й виводу растрових зображень;
- тематичні модулі, що забезпечують основними засобами аналізу растрових відеоданих (географічний аналіз, статистичний аналіз та обробка зображень), включають оверлейні операції, а також попиксельні арифметичні операції із зображеннями, елементи обробки цифрових моделей рельєфу, вимірювальні операції (площа, відстань, найкоротший шлях і т.п.), векторно-растрові й растрово-векторні перетворення (включаючи векторизацію полігонів) і візуалізацію векторних даних, математично-статистичні функції (регресійний, кореляційний, автокореляційний аналіз, полігони Тіссена), часовий аналіз і оцінку критеріїв, програми контрольованої й неконтрольованої класифікації й побудова 3-х мірних моделей, операції фільтрації;
- периферійні модулі, що містять утиліти конверсії між IDRISI і іншими програмами й форматами зберігання даних.

ILWIS (Integrated Land and Water Information System, (ITC)) розробляється Міжнародним інститутом аерокосмічних зйомок і наук про Землю (ITC), Нідерланди, з 1988 р. і призначена в першу чергу для навчання на міжнародних курсах ІТС. Це інтегрована растрово-векторна система. ILWIS може використовуватися для створення, управління, аналізу й відображення просторових (географічних) даних.

Система включає можливості ГІС і обробки зображень, працює з табличними даними й атрибутами, використовує векторні дані, отримані через дигитайзер; ефективно виконує конвертування даних вектор \Leftrightarrow растр, тим самим забезпечуючи деякі топологічні функції картографічних пакетів; здійснює програмне конвертування даних у багато стандартних форматів і з них, дозволяє виконувати екранне проектування на графічному моніторі без проміжних записів в пам'ять. Система має зручний операторський інтерфейс.

MultiSpec (Purdue Research Foundation. MultiSpec - програмний пакет, спеціально призначений для інтерактивного аналізу многозональних зображень земної поверхні, одержуваних різними знімальними системами. У пакеті є цільний і логічно обґрунтований набір алгоритмів для:

- імпорту й візуалізації зображень різних форматів;
- яркісної корекції зображень із побудовою гістограм і трансформування в задану систему координат;
- визначення найбільш інформативних дешифрувальних ознак;

- виконання двох основних типів комп'ютерної класифікації знімків: з навчанням і без навчання; алгоритм швидкого виділення кластерів - придатний для швидкого, однокрокового поділу многозонального знімка на просторово однорідні області; ітераційний алгоритм ISODATA - використовується для більш точної, багатокрокової кластеризації; методи мінімальної відстані, лінійного дискримінантного аналізу (Фішера), максимальної правдоподібності й два способи спектрально-просторової класифікації об'єктів за гіперспектральними знімками. Пакет поширюється безкоштовно в інформаційній мережі Інтернет.

Тема 2. Рівні цифрового оброблення знімків

Загальна характеристика цифрового оброблення даних дистанційного зондування Землі. Методи цифрового оброблення зображень отриманих засобами ДЗЗ із космосу поділяють на дві групи:

- 1) Методи, що забезпечують реставрацію і покращення візуального сприйняття космічних зображень.
- 2) Методи, що забезпечують автоматизоване розпізнавання та інтерпретацію об'єктів за їх зображеннями.

Перша група методів спрямована на поліпшення візуального дешифрування знімків, підвищення його об'єктивності і достовірності та підготовку знімків до подальшого автоматизованого дешифрування. Реставрація зображень передбачає процедури відновлення спотвореного зображення – **радіометричне, атмосферне та геометричне коригування**. Реставрація супутникових даних направлена на покращення їх якості та наближення до ідеального зображення. Реставрацію проводять методами геометричного та атмосферного коригування, а також компенсації зміни характеристик фотоприймача. При цьому інколи доводиться поновлювати пропущені дані, заповнювати ділянки, що закриті хмарами або не проявилися в достатній мірі тощо.

Для покращення зображення його перетворюють у форму, найбільш зручну для візуального або машинного аналізу. Радіометричне коригування проводять з метою виправлення радіометричних спотворень космознімка. Найскладнішим є коригування впливу рельєфу та атмосфери. Виправлення радіометричних спотворень космознімка, зумовлених рельєфом місцевості також називають топографічним коригування космічного знімка. Геометричне коригування призначене для виключення викривлень у відносному позиціюванні пікселів, що викликане кривизною та обертанням Землі, недосконалістю апаратури знімання. Крім виправлення геометричних спотворень на знімку необхідно проводити геометричне **трансформування зображення** в задану систему координат картографічної проекції, що необхідно для прив'язування знімку до території чи карти. Трансформування зображення – це процес перетворення зображення з метою приведення його до заданого масштабу та проекції з усуненням зміщень через нахил вісі зйомки (аерознімки), рельєфу місцевості та кривизни поверхні Землі, а також з виключенням геометричних викривлень. До перетворення геометричних характеристик належать мозаїка (монтаж) знімків, вирізання потрібного фрагменту, стиснення зображення.

Покращення зображень полягає у перетворенні яскравості, контрастності та фільтрації шумів. Основне їх призначення – модифікація даних з метою поліпшення зорового сприйняття зображення або перетворення у більш зручну форму для подальшого візуального чи

комп'ютерного аналізу. До модифікації значень окремих пікселів відносяться різні види лінійного і нелінійного контрастування, метою яких є підвищення контрастності, чіткості зображення. Отримання кольорових композитів забезпечують прийоми *синтезування зображень*. У результаті *синергізму знімків* із двох зображень різної якості отримується об'єднане зображення із найкращими характеристиками. До модифікацій пікселів з використанням значень сусідніх належать операції *фільтрації зображення*. Фільтри дають можливість зменшити шум, прибрати дрібні деталі, підкреслюванні контурів тощо. До перетворення геометричних характеристик слід віднести мозаїку (монтаж) зображень, вирізання окремих фрагментів, стиснення зображення.

Друга група методів направлена на розпізнавання та інтерпретацію об'єктів, що базуються на теорії розпізнавання образів і методиці дешифрування знімків. Розпізнавання об'єктів на знімках виконується шляхом проведення класифікації, автоматизованого розбиття пікселів зображення на класи чи кластери. Процедура класифікації ґрунтується на статистичному аналізі різних характеристик зображення: просторових, спектральних або часових. До просторових характеристик належать текстура, структура, рисунок, форма. Під часовими характеристиками розуміють зміну підстильної поверхні за порою року, але у більшості випадків для розпізнавання об'єктів застосовують їх спектральні характеристики на зображенні. Виділяють способи комп'ютерної класифікації з навчанням (*контрольована*) та без навчання (*неконтрольована*). При класифікації з навчанням завдання полягає у виявленні на зображенні об'єктів уже відомих типів, на основі яких створюються еталонні ділянки, що є типовими представниками даного класу об'єктів. Етап навчання полягає фактично в розрахунку й аналізі набору статистичних характеристик розподілу значень пікселів, що складають ці полігони. Класифікація без навчання або неконтрольована базується на кластерному аналізі, під час якого намагаються визначити всі типи об'єктів, а після кластеризації проводиться їх інтерпретація.

Інтерпретація є поняттям глибшим ніж розпізнавання зображень та передбачає визначення значимості отриманих якісних і кількісних характеристик із форми, розташування, структури, функції, якості, стану, відношення об'єктів між собою з використанням знань і досвіду науковців. Методи й прийоми інтерпретації суттєво відрізняються в залежності від тематики завдань: сільськогосподарські потреби, контроль глобального клімату, пошук корисних копалин, топографічне картографування, моніторинг земель, моніторинг надзвичайних ситуацій, національна безпека та охорона тощо.

Наступні методи оброблення зображень пов'язані із математичним перетворенням кількох спектральних зон, такі операції називають алгеброю зображень. До видів вторинних зображень належать різні *вегетаційні індекси*.

Рівні оброблення даних дистанційного зондування. Початком оброблення знімків є процедури отримання та реєстрації іконічних даних. Первинні дані – необроблені дані, отримані технічними засобами ДЗЗ (ДСТУ – 4220 – 2003).

Наземні комплекси приймання та реєстрації інформації з технічних засобів ДЗЗ повинні забезпечувати наступні операції оброблення іконічних даних: *попереднє оброблення, нормалізація, міжгалузеве та тематичне оброблення* (рис. 1).

Приймання інформації полягає в просторовому та спектральному виділенні наземними комплексами радіосигналів, що поступають із бортових знімальних систем. Просторове виділення сигналів забезпечується направленими властивостями антен наземних приймальних комплексів, а спектральне – частотною вибірковістю їх приймальних каналів.

Демодуляція полягає в перетворенні прийнятого радіосигналу в послідовність відеоімпульсів. Інформація надходить порціями – інформаційними кадрами, які містять службові та інформаційні слова пр. зображення та паспорти.

Завданням *декодування* є виявлення збоїв у прийнятій інформації та, по можливості, їх усунення, а в подальшому зняття засекречуючого кодування. Після розсекречування інформації вона проходить етап *декомутації* – розділення службових та інформаційних даних. Інформаційні дані поділяються на слова описання інформації (паспорти) та слова, що вміщують зображення від різноманітних датчиків, каналів та смуг огляду. Апаратура декомутації розподіляє вхідний потік інформаційних слів на окремі потоки для подальшого оброблення, а саме: селекція та вибір спектральних каналів, вибір смуги огляду, суміщення інформації датчиків різного типу. Кожному файлу в паспорті зазначають результати декодування та декомутації.

Після вищезазначених процедур на приймально-демодульованих системах вся інформація поступає на систему реєстрації та конвертування. *Реєстрація* цифрової інформації передбачає процедури проміжної реєстрації даних на реєстраторах високої щільності записування, формування заголовків вхідної інформації та по каналного введення у робочі станції конвертування. *Конвертування* передбачає уточнення параметрів орбіт космічних апаратів, формування паспортів знімків, перезаписування інформації на стандартні носії, автоматичне формування кадрів заданого формату відповідно космічного апарату, передавання кадрів на станції нормалізації. Конвертування може поєднуватися з оперативним переглядом інформації з метою усунення бракованих кадрів непридатних для подальшого оброблення.

Всі зазначені етапи на приймально-демодульованих системах відносяться до **попереднього оброблення** знімків і відповідають **рівню 0** оброблення знімків. **Рівень оброблення даних дистанційного зондування з космосу – це формалізований показник обсягу та змісту результатів оброблення даних (ДСТУ 4758:2007).**

Попереднє оброблення виконується після реєстрації “сирих даних” та включає операції розпаковування цифрового потоку інформації за знімальними приладами та спектральними каналами й перетворення їх у растрове зображення. Операції попереднього оброблення іконічних даних космічного знімання виконуються під час сеансу радіозв’язку (в реальному масштабі часу) з космічним літальним апаратом після проведення знімання. Оперативний перегляд та конвертування виконуються відразу після сеансу радіозв’язку.

Рівень 0 оброблення космознімка – це рівень оброблення даних ДЗЗ, змістом якого є формування вихідного космознімка з первинних даних і доповнення його необхідними мета даними [Відповідно до ДСТУ 4758:2007 С. 5].

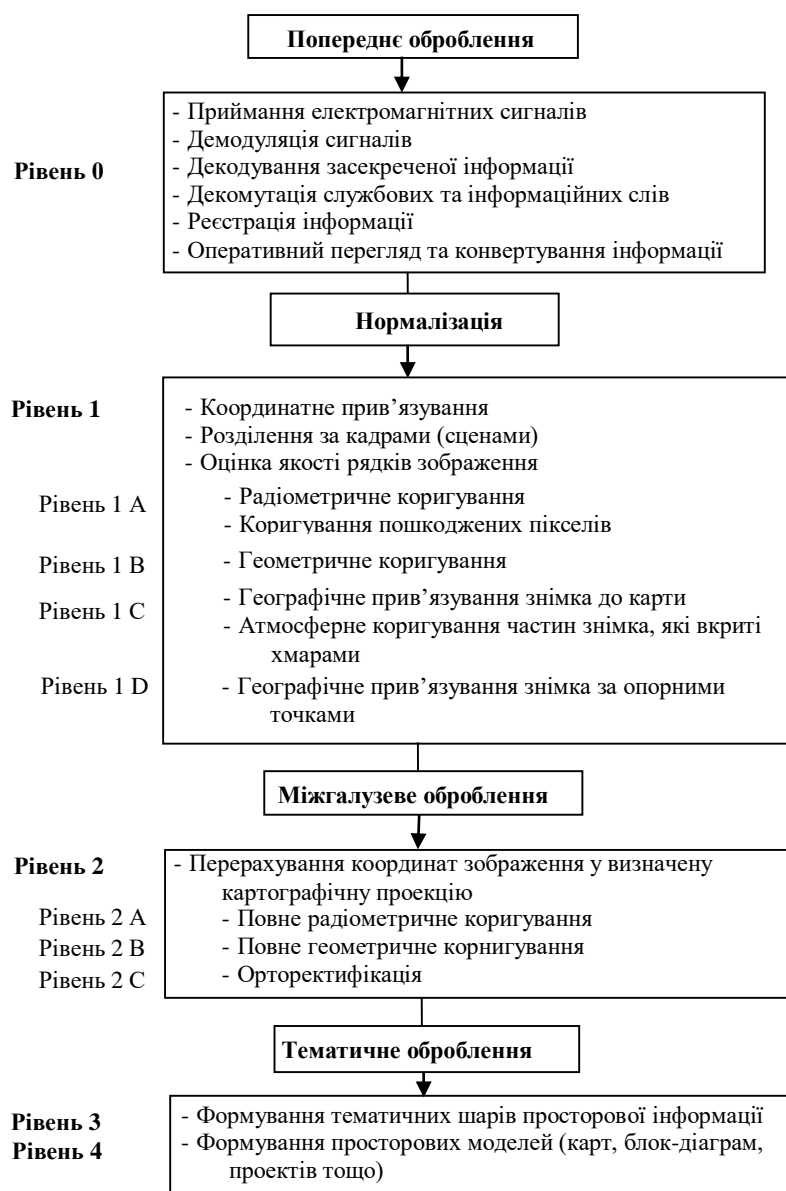


Рис. 1. Етапи та рівні оброблення знімків (за В.П.Манойловим і ін.).

Наступним етапом оброблення знімків є **нормалізація**, в результаті якої створюються повністю або частково виправлені (нормалізовані) знімки. Нормалізація цифрових знімків передбачає:

- геометричне коригування отриманих зображень;
- просторову прив'язку та картографічне трансформування знімків за паспортними даними;
- фотограмметричну обробку стереопар знімків;
- радіометричне коригування даних спотворених впливом атмосфери;
- усунення імпульсних завад і перешкод;
- складення анотацій до цифрових даних;
- оформлення кадрів необхідними атрибутами (контрольна напівтонова шкала, мітки тощо);
- реєстрацію нормалізованих даних на стандартних носіях.

При коригуванні стереопар створюються горизонтальні стереопари приведені до геодезичних координат. Знімки супроводжуються текстовою інформацією про носії знімальної апаратури, саму апаратуру, час та умови проведення знімання тощо. Процедура нормалізації проходять всі придатні для оброблення знімки.

Після нормалізації відхилення фактичного положення кожного елемента кадру від його теоретичного положення не повинно перевищувати 0,5 кроку елемента просторового розрізнення. Радіометричні викривлення повинні коригуватися до кінцевої похибки не більше 0,5% від максимальної яскравості зображення.

Етап нормалізації відповідає рівню 1 оброблення знімків який у свою чергу підрозділяється на ряд підетапів (рис. 1.)

Рівень 1 оброблення космознімка – це рівень оброблення даних ДЗЗ, змістом якого є виконання необхідних процедур геометричного та радіометричного коригування і просторового прив'язування за орбітальними даними.

Після проведення нормалізації знімки направляються до наступного етапу - **міжгалузевого оброблення**, суть якого у доведенні зображення до деякого стандартного вигляду та є найвищим спільним рівнем оброблення для різних галузей застосування знімків. Етап передбачає проведення повних геометричних та радіометричних коригувань та здійснення операції орторектифікації.

Орторектифікація (ортотрансформування) – це геометричне перетворення космознімка, щоб отримати зображення місцевості в ортогональній проекції. У процесі такого геометричного перетворення виправляються спотворення зображення, зумовлені нахилом площини знімка та рельєфом місцевості. У результаті проведення орторектифікації знімок перетворюється в планіметричне зображення без геометричних спотворень, крім вище названих, усуваються також спотворення зумовлені орієнтацією камери, впливом кривизни Землі та похибками математичної моделі зображення. Процедури міжгалузевого оброблення відповідають 2 рівню оброблення знімків (рис. 1).

Рівень 2 оброблення космознімка – це рівень оброблення даних ДЗЗ, змістом якого є його просторове прив'язування з використанням наземних опорних точок.

У результаті просторового прив'язування космознімка встановлюється однозначна відповідність між системою координат космознімка та географічною чи іншими подібними системами координат. Наземні опорні точки – це точки місцевості з відомими координатами, які можна ототожнити з їх образом на космознімку. У якості опорних точок на місцевості обирають природні та штучні об'єкти земної поверхні (перехрестя доріг, дамби, аеродроми, окремі будівлі тощо), які легко виявляються на знімках і картах та координати яких відомі. Після ідентифікації опорних точок відбувається точне прив'язування зображення за цими точками, підвищується точність розташування елементів кадру та виконується трансформування зображення в задану картографічну проекцію.

Точне радіометричне коригування передбачає підвищення абсолютної радіометричної точності зображення шляхом урахування даних калібрування спектральних каналів, зменшення похибок яскравості через низьку прозорість атмосфери, покращення сприйняття зображення (локальне контрастування, підкреслювання контурів, кольоросинтезування тощо).

Останній етап оброблення космознімків – це **тематичне оброблення**, що передбачає вилучення з коригованих знімків предметно-змістовної інформації та відповідає рівню оброблення 3 і 4 (рис. 1).

Рівень 3 оброблення космознімка – це рівень оброблення даних ДЗЗ, змістом якого є отримання значень дешифрувальних ознак або визначення фізичних параметрів об'єктів зондування.

Тематичне оброблення містить операції з дешифрування знімків, розробки легенди, підготовки звітних документів, оформлення карт та планів. Дешифрувальні ознаки як властивості об'єктів дають можливість відрізнити їх між собою та визначити фізичні параметри об'єктів (форма, довжина, висота тощо).

Рівень 4 оброблення космознімка – це рівень оброблення даних ДЗЗ, змістом якого є дешифрування космознімка та складання легенди.

На основі оброблених космічних знімків можливо створювати просторові моделі, тематичні шари інформації для оновлення даних, тематичні карти, ГІС-проекти тощо на електронних та паперових носіях.

З метою спрощення сприйняття у науково-технічній літературі подаються визначення знімків відповідно їх етапів оброблення:

- коригований космічний знімок – це знімок із проведеним радіометричним коригуванням;
- геокоригований - знімок із проведеним геометричним коригуванням;
- геокодований знімок – знімок із просторовою прив'язкою і трансформуванням зображення до заданої картографічної проекції без використання наземних контрольних точок;
- геокодований за місцевістю - знімок із просторовою прив'язкою і трансформуванням зображення до заданої картографічної проекції з використання наземних контрольних точок.

Рівні оброблення знімків основних космічних апаратів. Рівні обробки даних супутника QUICKBIRD. Компанія DigitalGlobe надає космічні знімки з супутника QuickBird і WorldView 1 з наступними рівнями попередньої обробки:

1. Basic (базовий);
2. Standard (стандартний);
3. Standard Ortho Ready (стандартний, підготовлений до ортотрансформування);
4. Ortho (ортотрансформований).

Перші три рівня обробки можуть використовуватися для подальшої геометричної корекції, в той час як для останнього типу ортотрансформування виконується тільки фахівцями компанії DigitalGlobe.

Basic. Космічні знімки з рівнем обробки Basic мають найменший ступінь попередньої обробки і включають радіометричну корекцію і корекцію спотворень датчика. Дані цього типу можна придбати тільки у вигляді цілого кадру. Космічні знімки з цим рівнем обробки поставляються разом з файлом даних підтримки зображення (ISD – Imagery Support Data), який містить основні метадані зображення, просторові параметри, ефемериди та інформацію про модель камери. Використовуючи цей файл, можна провести ортотрансформування зображення з застосуванням строгої моделі камери. Крім того, можна скористатися більш простим методом і обробити зображення за допомогою узагальненої моделі камери супутника у вигляді файлу RPC.

Standard. Космічні знімки з цим рівнем обробки являють собою цифрові космічні знімки рівня Basic, які трансформовані на поверхню Землі і приведені до картографічної проекції.

У зображення внесені поправки за рельєф з використанням наближеної ЦММ. Заявлена точність визначення планових координат становить $CE90\% = 23$ м (Планове положення будь-якої точки на знімку з імовірністю 90% буде перебувати в колі радіусом 23 м з центром, що збігається із справжнім станом точки, виключаючи будь-які топографічні зміщення і кут відхилення від надирки) або з СКО 14 м.

Оскільки зображення було необоротно спотворено застосуванням наближеною ЦММ, воно не може бути використано для подальшого точного ортотрансформування.

Знімки з рівнем обробки Standard, в першу чергу, призначені для користувачів, які потребують просторових даних невисокої точності, і не планують виконання геометричній корекції зображень власними силами.

Standard Ortho Ready. Космічні знімки з рівнем обробки Standard Ortho Ready можна розглядати як проміжний рівень попередньої обробки між Basic і Standard. У вихідні дані внесені ті ж самі виправлення, що і в знімки з рівнем обробки Standard, але при геометричній корекції не використовувалася наближена ЦММ. Тому ці зображення можна використовувати для подальшої геометричній корекції за допомогою файлу RPC і детальної ЦММ. Зображення рівня Standard Ortho Ready можуть поставлятися у вигляді полігону довільної форми.

Ortho. Космічні дані з цим рівнем обробки є ортотрансформованими зображеннями із супутників QuickBird і WorldView 1. При цьому замовнику необхідно надати наземні опорні точки і матрицю висот для досягнення необхідної точності. Найбільший інтерес для потенційних замовників представляють дані з рівнями обробки Basic і Standard Ortho Ready. Слід зазначити, що дані з рівнем обробки Basic поставляються тільки повними сценами і можуть виявитися набагато дорожче в порівнянні з даними рівня обробки Standard Ortho Ready, у якого можливе замовлення полігонів довільної форми. Крім того, дані з рівнем Basic вимагають серйозної додаткової фотограмметричної обробки для досягнення високої точності, і, відповідно, спеціалізованого програмного забезпечення і професійних навичок. Найбільшого поширення набули дані з рівнем обробки Standard Ortho Ready, завдяки можливості геометричної корекції космічних знімків у стандартному програмному забезпеченні методами на основі файлу RPC.

Вибір методу обробки залежить від необхідної точності, доступного програмного забезпечення для обробки, характеру рельєфу місцевості і розмірів оброблюваної області, а також якості допоміжних даних. Найбільш простим вибором для російських замовників залишаються космічні дані з рівнями обробки Geo для даних із супутників IKONOS і GeoEye 1 і Standard Ortho Ready для даних із супутників QuickBird і WorldView 1.

Рівні обробки даних супутника IKONOS і GeoEye 1. Космічні дані, одержувані з супутників QuickBird і IKONOS, в даний час покривають практично всю територію Землі і доступні широкому колу споживачів. Їх просторова розрізненість становить від 1 до 0,61 м в панхроматичному і від 4 до 2,44 м в мультиспектральному каналах. Після геометричного коригування дані надвисокої розрізненості цих космічних апаратів можна використовувати для створення картографічної продукції, що задовольняє вимогам масштабу 1:10 000 і дрібніше.

Алгоритм обробки з використанням файлу RPC підтримується всіма стандартними програмними комплексами, в тому числі ENVI (Environment for Visualizing Images), розробленим компанією ITT VIS (США). Компанія GeoEye уніфікувала рівні обробки космічних даних із супутників IKONOS і GeoEye 1.

Geo. Космічні знімки з рівнем обробки Geo піддаються геометричному коригуванню в найменшій мірі. Це зображення з просторовою прив'язкою, приведені до картографічної проекції без урахування впливу рельєфу. У комплект поставки входить функція RPC.

GeoProfessional. Космічні знімки з цим рівнем обробки є ортотрансформованими зображеннями з точністю, відповідно середньоквадратичній помилці (СКП) в плані 5 м.

Ортотрансформування здійснюється на основі грубої цифрової моделі місцевості (ЦММ), наступні геометричні перетворення космічних знімків рівня GeoProfessional неможливі.

GeoProfessional Precision. Космічні знімки з цим рівнем обробки є ортотрансформованими зображеннями з СКО в плані до 1 м. У разі замовлення космічних знімків цього рівня потрібно надати постачальнику даних - компанії GeoEye – ЦМР і опорні точки відповідної точності.

GeoStereo. Дані космічної зйомки з цим рівнем обробки являють собою стереопару, отриману з одного витка. Орієнтування знімків з рівнем обробки GeoStereo проводиться по орбітальним даним. Зображення поставляються з файлом RPC для подальшої фотограмметричної обробки в стандартному ПЗ.

GeoStereo Precision. Дані космічної зйомки з рівнем обробки GeoStereo є стереопара, отримана з одного витка. При цьому орієнтування знімків проводиться по опорних точках, які надаються замовником.

Найбільший інтерес для потенційних замовників представляють рівні обробки Geo, GeoProfessional і GeoStereo, для яких не потрібно передача постачальнику даних про рельєф, а також інформацію про наземні опорні точки. Слід зазначити, що дані з рівнем обробки GeoProfessional мають досить високу точність і готові до використання, але при самостійній обробці замовником продукції з рівнем обробки Geo і GeoStereo в стандартному програмному забезпеченні може бути отримана набагато більш висока точність.

Рівні обробки даних супутника Landsat. У залежності від сенсора дані супутника Landsat мають наступні рівні оброблення:

Рівень 0R_p для ETM+ (неокриговані ряди), дані цього рівня не підлягають радіометричному та геометричному коригуванню.

Рівень 1G для ETM+, TM, MSS (систематичне коригування), містить радіометричне і геометричне коригування.

Рівень 1G_SLC-off для ETM+ (систематичне коригування) із заповненням пропущених ділянок, отриманих у SLC-off режимі, включаючи радіометричне і геометричне коригування.

Рівень 1P для ETM+, TM, MSS (точне коригування) містить радіометричне і геометричне коригування з використанням GCP-точок.

Рівень 1T для ETM+, TM, MSS («земне коригування») включає радіометричне і геометричне коригування з використанням ЦМР.

Тема 3. Покращення якості зображення

Методи поліпшувальних перетворень зазвичай застосовують як перший крок у використанні знімків: для ідентифікації зображених територій і об'єктів, визначення місця їх розташування, для отримання інформації про їх зображувальні властивості та ознаки. Покращення зображень проводять для візуального аналізу об'єктів на багатозональних знімках і виконують завдяки зміні яскравості і контрастності всього зображення або його окремих частин; виділенню контурів заданої контрастності; фільтрації значень яскравості (згладжуваності); кольоровому синтезу і кодуванню кольорів. До одного зображення можна застосовувати декілька типів покращувальних перетворень залежно від завдання використання знімка. Вибір способу перетворення пов'язаний з урахуванням характеристик різних типів підстильної поверхні в різних зонах спектра.

Перетворення якості зображення засновані на уяві про ***спектральний простір і простір зображення***. Спектральний простір – це набір значень спектральних яскравостей, який можна трактувати як вектор у спектральному просторі. Розмірність простору відповідає кількості зон знімання, а координати векторів є спектральними ознаками об'єктів знімання. Простір зображення розглядає кожний піксель з його значеннями яскравості в системі координат растрового

зображення, осі якого – рядки і колонки і пов'язані з просторовим положенням об'єктів. Відповідно до цього методи обробки мають назви – методи спектральних і просторових перетворень.

Методи спектрального покращення зображень реалізують з урахуванням індивідуальних значень яскравості пікселів у межах кожної ділянки спектра. В їх основі лежить аналіз і перетворення гістограм – графічного подання розподілу спектральних яскравостей знімка. При цьому нової інформації не утворюється, відбувається лише перерозподіл початкової інформації з метою підкреслювання спектральних властивостей об'єкта.

Методи просторового покращення засновані на аналізі значень сусідніх пікселів і застосовують їх або локально для деякого оточення заданого пікселя, або глобально – до всього зображення і одночасно в усіх зонах.

Методи спектрального покращення. Найчастіше використовують наступні методи спектрального покращення:

- 1) Контрастування - перетворення контрастності – лінійне, нелінійне та кусково-лінійне;
- 2) Еквалізація гістограм;
- 3) Підбір гістограм;
- 4) Інверсія зображень;
- 5) Квантування знімків.

Перетворення контрастності засновано на регулюванні співвідношення між яскравістю пікселів цифрового знімку в файлі та на екрані комп'ютера, яке задається спеціальною функцією – *кривою відтворення яскравостей*.

Її відображають на графіку, на якому по горизонтальній вісі відкладено значення яскравості в файлі, а по вертикальній вісі – значення яскравості на екрані. Якщо крива відтворення яскравостей є пряма лінія, що виходить з початку координат під кутом 45° , це означає, що всі значення яскравостей з файлу відображаються такими ж значеннями яскравості на екрані.

Однак загальний діапазон яскравостей знімка складає лише частину з максимально можливого. Важливо щоб головні для дешифрувальника об'єкти відобразилися з гарним проробленням. Для цього необхідно діапазон яскравостей об'єктів у файлі відобразити більш широким діапазоном яскравостей цих об'єктів на екрані, щоб посилити кольорові відміни між деталями. Тобто пряму лінію перетворюють на частково-лінійну ламану або криву лінію. У діапазоні яскравостей що відповідає дешифрувальним об'єктам крива відтворення яскравостей повинна мати найбільшу крутизну. Значенням яскравості, що лежать за межами яскравостей знімка, відповідають горизонтальні ділянки кривої і вони відображаються одним значенням яскравості на екрані.

Для зміни і вибору оптимальної кривої відтворення яскравостей доцільно використовувати *гістограму яскравостей цифрового знімку* – графік, що відображає по одній вісі значення яскравостей, а по іншій – кількість пікселів з такими значеннями.

Чим рівномірніше розподіляються піксели на гістограмі, тим більше відтінків можна розрізнити на екранному знімку. Форму кривої відтворення яскравості можна задавати вручну на основі досвіду роботи або використовувати способи рекомендовані програмами оброблення знімків. Для кольорового зображення функція передавання задається окремо для кожної спектральної зони у відповідності з її діапазоном яскравостей.

Інтервал яскравості окремого знімку може бути дуже невеликим – 40-50 або навіть 30 рівнів. На такому знімку об'єкти відображаються майже однаково і розрізняються важко. Якщо інтервал яскравостей розташований у нижній шкалі яскравостей, то при виводі на екран знімок може не читатися.

Існує цілий ряд способів покращення візуального сприйняття зображення. Найбільш поширений – **контрастування** – виконується шляхом перетворення гістограми зображення. Існує два підходи до вирішення завдання: перший полягає в розтягненні гістограми, а інший – в перерозподілі значень яскравості.

Розтягнення гістограми можна проводити наступними способами: **лінійним, нелінійним, частково-лінійним та довільним**.

Контрастування полягає в розтягненні існуючого на знімку інтервалу яскравостей. Процедура виконується шляхом перерахування значень яскравості у відповідності з заданою математичною залежністю (лінійною, логарифмічною, експоненціальною). Лінійне підвищення контрастності є простим способом покращення його візуального сприйняття.

Аналогічно виконується **нелінійне** контрастування, лише використовують рівняння іншого виду. Нелінійне покращення контрастності використовують для поступового збільшення або зменшення контрасту всього зображення. Зазвичай нелінійні покращення підвищують контрастність одної частини діапазону міни яскравості та зменшують в інших.

Частково-лінійне контрастування використовується для збільшення контрасту зображень, що мають менший динамічний діапазон яскравості ніж динамічний діапазон детектора, або для покращення зображень затінених ділянок. **Частково-лінійне** контрастування дає змогу поліпшити частину даних за допомогою розділення графіка перетворення на три частини, що відповідають низькій, середній та високій змінам контрасту. Функція частково-лінійного підвищення контрасту будується так, щоб у кожній зоні знімка значення пікселів змінювалися від 0 до 255.

Довільне перетворення (нормалізація) є обраним виконавцем і не залежить від математичних виразів. У випадку коли дешифрувальника цікавлять не всі об'єкти на знімку а лише їх частина ефективним є зміна не всієї гістограми а лише її частини, тобто використання довільного контрастування. Графік перетворення підбирається таким чином, що зростає контраст зображення лише необхідних об'єктів або лише найбільш інформативної ділянки. Менш інформативні ділянки при цьому виключаються із розгляду. Це призводить до деякого спотворення яскравості, але дає можливість більше розтягнути гістограму за координатою яскравості, тобто підвищити контрастність зображення переважної більшості пікселів.

Інший підхід до контрастування зображення (перерозподіл значень яскравості) полягає у **вирівнюванні (еквалізації) гістограми**. Це нелінійне перетворення, суть якого полягає в апроксимації вихідної гістограми гістограмою ідеальної форми, в якому кожному значенню яскравості повинна відповідати однакова кількість пікселів.

Перетворення яскравості є фактично зміною масштабу гістограми за координатою яскравості. Збільшення крутизни функції перетворення еквівалентно розтягуванню гістограми за координатою яскравості. При цьому зростає не тільки дискретність відліку яскравості (контрастність), а змінюється й середня яскравість (світність) зображення. Таким чином, зміна масштабу гістограми за рахунок використання різних функцій перетворення яскравості забезпечує можливість регулювання контрастності зображення та його світності. Зсув початку відліку яскравості на перетвореній гістограмі також еквівалентний зміні середньої яскравості знімку, тобто його світності.

Підбір гістограм полягає у перетворенні гістограми яскравості вихідного знімка до гістограми іншого. Підбір гістограм використовується для вирівнювання яскравості й контрасту однакових або сусідніх кадрів, які отримані у різних умовах. Така операція необхідна для створення мозаїк (монтажу) знімків. Для підбору гістограми використовуються зображення з близькими просторовими характеристиками.

Інверсія – перетворення зображення зі зворотним контрастом щодо початкового: темний елемент стає світлим, і навпаки. Інверсію використовують також для переведення негативного зображення в позитивне. Процедура має два варіанти: інверсію та реверсію.

Квантування знімків – різновид перетворення, коли безперервне напівтонове зображення замінюється дискретним, яскравість якого розділена на декілька ступенів. У результаті такого перетворення дрібні деталі, які засмічують зображення зникають, поступова зміна яскравості замінюється чіткою границею і закономірності розподілу яскравостей на знімку стає більш чітко вираженим. У практиці розпізнавання знімків використовується рівномірне і нерівномірне квантування. При рівномірному квантуванні діапазон яскравостей знімка ділиться на рівні ступені. Воно використовується для дискретизації зображень об'єктів з плавно змінювальними характеристиками, наприклад, розподілення вод за ступенем мутності.

Нерівномірне квантування виконується для виділення певних видів об'єктів, яким відповідають ступені яскравості різної величини. Найпростіший випадок – бінарне квантування зображення на два рівня яскравості за значеннями, що встановлює дешифрувальник. Неправильний вибір ступенів квантування може призвести до появи хибних контурів або об'єднання в одному контурі різнорідних об'єктів. Для запобігання необхідно використовувати допоміжні матеріали: криві спектрального образу або відповідні картографічні матеріали.

Наш зір розрізняє кольори краще ніж відтінки сірої шкали, тому сприйняття квантованих знімків можна покращити шляхом заміни чорно-білої шкали кольоровою, тобто присвоїти виділеним ступеням певні кольори. Така процедура має назву *кольорокодування*. Його використання доречно, коли кількість рівнів яскравості на квантованому зображенні більше 10, однак для запобігання строкатості зображення використовують не більше 30 кольорів.

Методи просторового покращення. Фільтрація – перетворення у процесі якого надлишкова для вирішення певної задачі інформація відсіюється, а необхідна зводиться до вигляду, що спрощує її використання. Фільтрація – це перетворення, що дозволяє підсилити відтворення тих чи інших об'єктів, видалити випадкові завади (шуми). Цей вид перетворень використовується для підкреслення контурів, виділення лінійних елементів певного орієнтування, виявлення змін зображення на серії знімків, для ліквідації різних перешкод на зображенні. Найбільше поширення отримали два комп'ютерних способи фільтрації: зміна яскравості в «ковзному вікні» та перетворення Фур'є.

Виправлення недоліків у зображенні проводять методами просторової фільтрації. Один з найпростіших способів фільтрації – перетворення в ковзному вікні. При такому перетворенні перераховуються значення яскравості всіх пікселів зображення. Перерахунок відбувається для кожного пікселя таким чином: коли даний піксель є центральним у вікні, яке "рухається" по знімку, йому дається нове значення, яке є функцією від значень оточуючих його у вікні пікселів. Операцію застосовують до пікселя, що перебуває в центрі вікна. Розмір вікна може бути, наприклад, 3x3 або 5x5 пікселів. Кожен раз вікно зміщується на 1 піксель і рухається до тих пір, поки не пройде весь знімок. Для пікселів вікна дослідник встановлює вагові коефіцієнти виходячи з цілей дешифрування.

У математиці таку операцію називають *згорткою*, а матрицю («ковзне вікно») – *ядром згортки*. Фільтрація – поширений термін, який належить до зміни просторових і спектральних характеристик об'єктів для поліпшення зображення, тому матричну функцію (ядро згортки), що застосована у «ковзному вікні» називають *фільтром*.

Загальна формула фільтрації має вигляд:

$$B(f) = \frac{\sum_{i=1}^q (\sum_{j=1}^q f_{ij} B_{ij})}{F}$$

де

$B(f)$ – значення пікселя перетвореного зображення (результат фільтрації);

f_{ij} - числові значення коефіцієнтів фільтра, розміщені в i -тому рядку і в j -й колонці матриці;

B_{ij} - значення пікселя початкового зображення в межах ковзного вікна, що відповідає f_{ij} ;

q – розмір фільтра, визначальний розмір боку «ковзного вікна»;

F – величина, що залежить від типу операції фільтрації і дорівнює або сумі коефіцієнтів фільтра, або 1, якщо сума коефіцієнтів дорівнює 0.

Таблиця 1

Типи локальних фільтрів

Типи фільтра	Вихід	Приклади	Області застосування
Лінійний	Зважена сума	Низькочастотний фільтр (середньоарифметичний) Високочастотний фільтр Смуговий фільтр	Коригування знімків, моделювання датчика, усунення шуму
Статистичний	Задана статистична характеристика	Медіана Адаптивний (стандартне відхилення) Мода	Усунення шуму, виділення ознак, вимірювання відношень сигнал/шум
Гradientний	Вектор градієнта	Фільтр Собела, фільтр Робертса	Виділення меж

Лінійні фільтри розраховуються в просторовій області як зважена сума вихідних значень пікселів у ковзному вікні.

Середньоарифметичний фільтр (Mean, 3×3 , 5×5 , 7×7) (низькочастотний) зазвичай використовують для генералізації або згладжування зображення. Всі його коефіцієнти в межах вікна 3×3 мають значення 1. Значення яскравості центрального пікселя вікна замінюється арифметичним середнім яскравості усіх пікселів ковзного вікна. Теоретично світлі й темні пікселі в межах вікна зводитимуть один одного нанівець. Загалом фільтри, що складаються із ненульових елементів ковзного вікна, нормована сума яких дорівнює 1, є усереднюючими, що призводить до послаблення шумів і розмиття границь та деталей зображення.

Високочастотні фільтри (High Pass, 3×3) застосовують для того, щоб поступово видалити змінні значення і підкреслити високочастотні локальні зміни, виокремити ділянки різких переходів на фоні поступових змін. Коефіцієнтами такого фільтра, наприклад для вікна 3×3 , є 8 у центрі і 1 всі інші. Для підкреслення граничних значень експериментально збільшують значення в центрі.

Варіант зображення із *смуговою фільтрацією* можна представити як результат послідовного застосування фільтрів низьких і високих частот. В основному такі фільтри використовують для виділення і усунення періодичних шумів.

Медіанний, адаптивний, модальний фільтри є статистичними. В цих способах матриця фільтра не створюється. Значення яскравості центрального пікселя ковзного вікна замінюється

числом, яке визначається шляхом аналізу статистичних параметрів розподілення яскравості у межах ковзного вікна. Статистичні фільтри використовують для зменшення випадкових шумів на зображенні із збереженням меж об'єктів.

Медіанний фільтр (Median, 3×3, 5×5) відноситься до рангових. Значення пікселів ковзного вікна упорядковуються за зростанням і центральному пікселю присвоюється значення яскравості середнього пікселя варіаційного ряду. Операція медіанного фільтра має ефект виключення пікселя, що має нетипове статистичне значення в локальному оточенні (локальний шум). Прикладом застосування медіанного фільтру є прибирання смугастості зображення, що викликано несправністю детекторів.

В *адаптивному* фільтрі (Adaptive Box, 3×3, 5×5, 7×7) в межах вікна обчислюється стандартне відхилення значень яскравості пікселів від значення в центральному пікселі. Яскравість у центральному пікселі замінюється нулем, якщо стандартне відхилення нижче за заданий користувачем поріг, і середнім із значень інших пікселів, якщо відхилення вище.

У *модальному* фільтрі (Mode, 3×3, 5×5, 7×7) значення в центрі вікна замінюється на значення, що найчастіше зустрічається в межах вікна, що відповідає піку або моді гістограми. До цієї групи методів фільтрації належить спосіб, у якому центральному пікселю присвоюється мінімальне або максимальне значення яскравості у вікні.

Однією з типових задач обробки зображень є визначення найбільш різких просторових змін у значеннях пікселів. Такі зміни зазвичай відповідають деякій фізичній межі на цифровому знімку, наприклад, береговій лінії, дорожньому покриттю тощо. Для вирішення такого завдання застосовують метод, що базується на поєднанні просторової високочастотної фільтрації та порогових значень пікселів. *Підкреслювання контурів (градієнтні фільтри)* – полягає у виявленні пограничних пікселів та збільшенні значень їх яскравості. Відбувається співставлення значень яскравості кожного з пікселів і його «найближчих сусідів». Виділення меж – це завдання бінарної класифікації, яку можна вирішити за допомогою порогових значень модуля градієнта. При цьому занадто низький поріг може привести до виділення великої кількості пікселів і до появи на зображенні широких та нечітких меж. Однак занадто високий поріг призведе до розбиття меж на окремі сегменти.

Таблиця 2

Приклади локальних градієнтних фільтрів

Фільтр	Горизонтальна компонента	Вертикальна компонента
Робертса	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Собеля	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Превітта	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

Для видалення шуму регулярного характеру такого як смуги, плями, спотворення від вібрації знімальної апаратури тощо використовують *перетворення Фур'є*, що базується на розпізнаванні періодичності зображення. Перетворення Фур'є виконує поліпшення зображення завдяки його розділенню на безліч різних просторово-частотних компонент. Згідно цього методу просторовий розподіл яскравості на знімку, що фіксується послідовностями пікселів рядків і стовпців, може бути представлений у частотній ділянці лінійною комбінацією періодичних

функцій \sin і \cos з певними коефіцієнтами. Функції з довгими періодами відображують низькочастотні компоненти, з короткими періодами – високочастотні. Для обробки растрових знімків розроблено дискретне перетворення Фур'є і його високоефективну комп'ютерну версію, що має назву швидке перетворення Фур'є.

Кольорове синтезування космознімків. Візуальний співставний аналіз декількох зональних знімків малоефективний, тому розроблені та застосовуються ряд перетворень, що зводяться до основної цілі: зжати зображення та покращити його візуальне сприйняття.

Кольорове зображення на моніторі комп'ютера виходить шляхом додавання трьох основних кольорів. За основні прийняті кольори відповідні монохроматичним випромінюванням із довжиною хвилі 0.7 мкм (червоний - R); 0.5461 мкм (зелений - G); 0.4358 (синій - B). Таке уявлення кольору називають колірною моделлю RGB. У файлі кольорового зображення, для кожного пікселя записано три числа, які означають інтенсивності трьох основних кольорів, діапазон значень від 0 до 255.

Синтезування кольорових зображень на екрані комп'ютера відбувається адитивним способом (RGB). Якщо значення яскравості $R = 255$, $G = 0$, $B = 0$, то піксель буде забарвлений у червоний колір. 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 в залежності від значень яскравості R, G, B піксель буде забарвлений у певний колір. Якщо вивести на екран дисплея зображення одного каналу багатоспектрального знімка, то воно буде забарвлене в сірі тони (напівтонове зображення). Щоб отримати кольорове зображення потрібно скласти три канали багатоспектрального знімка. Один з яких буде червоний (R), інший зелений (G), третій синій (B). Найбільш частіше для синтезування використовують зони 0,5 – 0,6; 0,6 – 0,7; 0,8 – 1,1 мкм або аналогічні їм, яким надають відповідно синій, зелений та червоний кольори. Цей варіант синтезу називають *стандартним*. Рослинистість на такому зображенні має червоний колір, що пояснюється її високою яскравістю в ближній інфрачервоній зоні спектру. Оголені поверхні набувають сіро-блакитний колір, водні поверхні – синій. Найчастіше використовують наступні варіанти кольорового синтезу: натуральне кольоропередавання (природні кольори), близьке до натурального та спотворене (штучні кольори).

На практиці якісне синтезування можна отримати після контрастування зональних знімків. Якщо кількість спектрозональних знімків більше трьох, то виникає проблема вибору пріоритетних трьох знімків. Для чого варто керуватися призначенням синтезованого зображення та величиною кореляції між зональними знімками. Із найбільш корельованих зображень обирається одне.

Сутність об'єктів доцільно визначати за знімками з природним кольоропередаванням, а розділення об'єктів та виділення їх границь виконувати за знімками з хибним кольоропередаванням. Деколи виконують протилежний прийом розщеплення синтезованого зображення на компоненти RGB і отримання трьох зображень.

Покращення просторового розрізнення багатозональних знімків. Синергізм знімків або Pan-sharpening (штучне збільшення просторової розрізненності) – це злиття різних зображень, що приведені до єдиної системи координат, з метою отримання покращеного зображення. Наприклад, синергізм сканерних знімків у видимому діапазоні і радіолокаційних знімків. Найбільш широко застосовують синергізм панхроматичного зображення високої розрізненності з кольоровим синтезованим (багатозональним) зображенням більш низької розрізненності.

При цьому створюється новий багатозональний знімок з такою ж кількістю пікселів, як на панхроматичному знімку, і з такою ж розрізненністю, але має кольорове синтезоване зображення.

Інший розповсюджений спосіб синергізму базується на використанні *методу головних компонент*.

Метод головних компонент (МГК, англ. principal component analysis, PCA) — метод факторного аналізу в статистиці, який використовує ортогональне перетворення множини спостережень з можливо пов'язаними змінними (сутностями, кожна з яких набуває різних числових значень) у множину змінних без лінійної кореляції, які називаються головними компонентами. Це один із основних способів зменшити розмірність даних, втративши найменшу кількість інформації.

Метод головних компонент для знімків використовують для визначення статистично незалежних похідних ознак об'єктів, а також виокремлення і відображення їх спектрального контрасту. *Аналіз головних компонент (Principal Components Analysis)* – це метод аналізу багатоспектральних корельованих даних. Термін корельовані дані означає, що при зростанні значення яскравості пікселів в одному спектральному каналі зростають значення яскравості й в інших спектральних каналах.

Суть методу можна пояснити на прикладі двох спектральних каналів, які показують співвідношення їх значень яскравості. Якщо розподіл значень яскравості в кожній зоні нормальний або близький до нормального, то цей розподіл має вигляд хмари, яку називають у статистиці *еліпсом розсіювання*. Під час виконання перетворення методом головних компонент осі спектрального простору повертають так, щоб нові осі стали паралельними осям еліпсоїда розсіювання. Таким чином, перша головна компонента буде відповідати найбільшій осі еліпса – напрямку найбільшого розкиду значень яскравості. Друга головна компонента відповідає найбільшому поперечному перерізу еліпса, ортогональному до першої головної компоненти. У n -вимірному просторі кожна наступна головна компонента буде одним із поперечних перерізів еліпса розсіювання, ортогональним до попередніх компонент і характеризуватиме значення даних, що не враховані попередніми головними компонентами.

Можливості аналізу головних компонент:

1. Якщо знімок містить більше трьох спектральних каналів, можна створити кольорове зображення з трьох головних компонент, оскільки в типовому багатозональному зображенні зазвичай перші два або три компонента здатні описати практично всю мінливість спектральних характеристик. Решта компонент найчастіше усього схильні до шумових впливів. Відкидаючи ці компоненти можна зменшити об'єм даних без помітної втрати інформації.

2. Якщо дрібні об'єкти низького контрасту погано дешифруються на вихідних знімках, то найчастіше на зображеннях окремих спектральних компонент виявляються добре. Таке перетворення проводять для серії різночасових знімків, приведених в єдину систему координат, для виявлення динаміки, яка яскраво проявляється в одній або двох компонентах.

Створення індексних зображень. Індексні зображення отримують шляхом простих перетворень знімків на основі арифметичних операцій із значеннями яскравості у різних спектральних зонах (їх складання, віднімання, ділення, множення). Такі операції називають *алгеброю зображень*.

При вивченні об'єктів по багатозональним знімкам часто важливі не абсолютні значення, а характерні співвідношення між значеннями яскравості об'єкта в різних спектральних зонах. На таких зображеннях більш яскраво і контрастно виділяються обрані об'єкти в порівнянні з вихідним знімком.

До видів вторинних зображень належать вегетаційні індекси, наприклад, широко поширені перетворення зображень засновані на різницях яскравості природних об'єктів у видимій та ближній інфрачервоній частинах спектру. Такі перетворення дають можливість відділити зелену

рослинність від ґрунтового покриву та водних об'єктів. Інший вид вторинних зображень засновано на використанні методу головних компонент. Метод використовується для перетворення кількох спектральних зон знімка таким чином, щоб нові зони вторинного зображення (компоненти) не корелювали між собою і розміщувалися в порядку зменшення кількості наявної інформації.

Розрахунок вегетаційних індексів спрямований на створення похідних ознак – характеристик спектрального контрасту між зонами, які відбивають форму кривих спектрального образу. Вони досить інваріантні до умов спостереження порівняно з абсолютними значеннями спектральних яскравостей і дають змогу аналізувати класи об'єктів використовуючи некалібровані значення яскравості на вихідному знімку (наприклад, без урахування впливу атмосферних умов знімання).

Вегетаційний індекс – це показник, який розраховується у результаті операцій з різними спектральними зонами і має відношення до параметрів рослинності певного пікселя знімка. Ефективність індексу визначається особливостями відбивання.

Таблиця 3

Базові вегетаційні індекси

Типи вегетаційного індексу (BI)	Формула і стислий опис	Автори
Відносний BI (Ratio VI, RVI, Simple Ratio (SR))	$RVI = \frac{B_{NIR}}{B_R}$ <p>де, B_{IR} – значення яскравості пікселя в ближній інфрачервоній зоні спектра; B_R – значення яскравості пікселя в червоній зоні спектра. Значення індексу змінюються від 0 до нескінченності. Для зеленої рослинності значення $VI > 1$ і зростають зі збільшенням зеленої фітомаси, щільності рослинності (зазвичай приймають значення 2–8)</p>	Birth і McVey, 1968; Jordan C.F., 1969; Rouse J.W. та ін., 1973; Tucker C.J. та ін., 1979
Нормалізований вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)	$NDVI = \frac{B_{NIR} - B_R}{B_{NIR} + B_R}$ <p>Індекс може приймати значення від -1 до 1. Для рослинності індекс NDVI приймає позитивні значення, зазвичай від 0.2 до 0.8</p>	Вперше описаний Rouse B.J. та ін., 1973, концепція вперше представлена Krieglner F.J. та ін., 1969
Трансформований вегетаційний індекс (Transformed Vegetation Index TVI)	$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5}$ <p>0.5 додається для виключення від'ємних значень під коренем. Функціонально TVI і NDVI еквівалентні</p>	Tucker C.J. та ін., 1979
Інфрачервоний вегетаційний індекс (Infrared Percentage VI, IPVI)	$IPVI = \frac{B_{NIR}}{B_{NIR} + B_R} = \frac{NDVI + 1}{2}$ <p>Функціонально IPVI і NDVI еквівалентні. Індекс може приймати значення від 0 до 1. Для зеленої рослинності характерні значення від 0.6 до 0.9</p>	Crippen R.E., 1990
Різницевий вегетаційний індекс (Difference VI, DVI)	$DVI = B_{NIR} - B_R$ <p>Індекс може приймати будь-які значення. Ізо вегетаційні лінії йдуть паралельно одна одній</p>	Lillesand T.M. і Kiefer R. W., 1987; Richardson і Everitt, 1992
Перпендикулярний вегетаційний індекс (Perpendicular)	$PVI = \sin(\alpha) B_{NIR} - \cos(\alpha) B_R$ <p>де α – кут між ґрунтовою лінією і віссю NIR. Індекс може приймати значення від -1 до 1.</p>	Richardson A.J. і Wiegand C.L., 1977

Vegetation Index (PVI)		
Зважений різницевий вегетаційний індекс (Weighted Difference VI, WdVI)	$WDVI = B_{NIR} - gB_R$ <p>де, g – нахил ґрунтової лінії. Зв'язаний з PVI приблизно так само, як IPVI зв'язаний з NDVI. WdVI – це математично більш простіший варіант PVI, але він має необмежений діапазон значень. Як і PVI, WdVI дуже чутливий до атмосферного впливу (Qi та ін., 1994) Можливі будь-які значення</p>	Clevers J.G., 1988
Ґрунтовий вегетаційний індекс (Soil Adjusted VI, SAVI)	$SAVI = \frac{B_{NIR} - B_R}{B_{NIR} + B_R + L} = (1 + L)$ <p>де, L = [0;1], L = 0 для дуже густого рослинного покриву, L = 1 для дуже розрідженого, найчастіше усього використовують значення L = 0.5 (Huete і Liu, 1994). Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів проходить через точку 0</p>	Huete A.R., 1988 Huete A.R. і Liu H., 1994, Qi J. та ін., 1994
Індекс глобального моніторингу навколишнього середовища (Global Environmental Monitoring Index, GEMI)	$GEMI = E(1 - 0,25E) - \frac{B_R - 0,125}{1 - B_R}$ <p>де</p> $E = \frac{2(B_{NIR}^2 - B_R^2) + 1,5B_{NIR} + 0,5B_R}{B_{NIR} + B_R + 0,5}$ <p>Значення індексу змінюються від 0 до 1</p>	Pinty B. і Verstraete M.M., 1991; Leprieur C. та ін., 1994.
Веgetаційний індекс, стійкий до впливу атмосфери (Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI)	$ARVI = \frac{B_{NIR} - R_b}{B_{NIR} + R_b}$ <p>де,</p> $R_b = B_R - \alpha(B_R - B_B)$ <p>де, B_B- значення яскравості пікселя у блакитному діапазоні. Зазвичай, $\alpha=1$, при малому покритті рослинності і невідомому типу атмосфери $\alpha=0.5$ (Kaufman Y.J., 1992) Він використовує значення відбиття в синій зоні, щоб усунути вплив атмосфери на коефіцієнти відбиття у червоній зоні. Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил і проходить через точку 0</p>	Kaufman, Y.J., Tanre, D., 1992; Kaufman, Y.J. і D. Tanre, 1996; Huete A.R. і Liu H., 1994

Відносний вегетаційний індекс (Ratio VI, RVI, Simple Ratio (SR)) це просте зональне відношення яскравостей значення пікселя у ближній інфрачервоній та червоній зоні спектра. Застосування відношень яскравості пікселя різних спектральних зон забезпечує зменшення впливу рівня освітленості та прозорості атмосфери на точність результатів розрахунку. Параметри індексу:

- ізовеgetаційні лінії сходяться на початку координат;
- ґрунтова лінія проходить через початок координат, нахил =0;
- можливі значення від нуля до безкінечності.

На значення вегетаційних індексів впливає не тільки рівень фіто маси, а й вид рослинності, кут візування, колір ґрунту тощо. Тому для знімків різних регіонів й умов знімання необхідно розраховувати окремий *нормалізований вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)*. Для зеленої рослинності $NDVI > 0$ й чим більше зелена фіто маса, тим більше значення NDVI. Праметри індексу:

- ізовеgetаційні лінії сходяться на початку координат;
- ґрунтова лінія проходить через початок координат, нахил =1;
- можливі значення від -1 до +1.

Більшість індексів створюється емпіричним шляхом, керуючись певними тематичними міркуваннями. При здійсненні практичних досліджень за знімками часто використовують *трансформований вегетаційний індекс (Transformed Vegetation Index TVI)*.

Інфрачервоний вегетаційний індекс (Infrared Percentage VI, IPVI). Параметри індексу:

- ізо вегетаційні лінії сходяться на початку координат;
- ґрунтова лінія проходить через початок координат, нахил =1;
- можливі значення від 0 до +1.

Різницевий вегетаційний індекс (Difference VI, DVI). Параметри індексу:

- перпендикулярний індекс;
- ізо вегетаційна лінія може мати довільний нахил і проходить через початок координат;
- можливі значення будь-які.

Перпендикулярний вегетаційний індекс (Perpendicular Vegetation Index (PVI)) досить чутливий до впливу атмосфери. Порівняння значень PVI для даних різних дат некоректне, якщо не було проведено їх атмосферне коригування. Параметри індексу:

- перпендикулярний індекс;
- ізо вегетаційні лінії паралельні ґрунтовій;
- ґрунтова лінія може мати різний нахил, проходить через початок координат;
- можливі значення від -1 до +1.

Зважений різницевий вегетаційний індекс (Weighted Difference VI, WDVI) математично простіший варіант PVI, але має необмежений діапазон значень. Дуже чутливий до атмосферного впливу. Параметри індексу:

- перпендикулярний індекс;
- ізо вегетаційні лінії паралельні ґрунтовій;
- ґрунтова лінія може мати різний нахил, проходить через початок координат;
- можливі значення будь-які.

Для знімків територій із розрідженим рослинним покривом, де значний вклад у яскравість пікселів вносить ґрунт, використовують *Ґрунтовий вегетаційний індекс (Soil Adjusted VI, SAVI)*. Параметри індексу:

- відносний індекс;
- ізо вегетаційні лінії сходяться в квадранті від'ємних значень RED і NIR;
- ґрунтова лінія має нахил і проходить через точку 0;
- можливі значення від -1 до +1.

Індекс глобального моніторингу навколишнього середовища (Global Environmental Monitoring Index, GEMI). Автори намагалися уникнути необхідності проводити детальне атмосферне коригування шляхом конструювання загальної поправки на вплив атмосфери для вегетаційного індексу. Вони дослідним шляхом встановили нечутливість індексу до впливу атмосфери та випадки явних похибок через ґрунтовий шум за низького рослинного покриву. Параметри індексу:

- нелінійний індекс;
- складні вегетаційні ізо лінії;
- значення індексу варією від 0 до +1.

Веgetаційний індекс, стійкий до впливу атмосфери (Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI). Стійкість до атмосферного і ґрунтового шумів різко падає, якщо рослинний покрив низький. Параметри індексу:

- відносний індекс;
- ізовегетаційні лінії проводяться як у вихідних індексах;
- ґрунтова лінія поводиться як у вихідних індексах;
- можливі значення від -1 до +1.

Ґрунтова лінія є важливим показником для обчислення вегетаційних індексів. Це гіпотетична лінія у спектральному просторі, що описує варіацію спектра відкритого ґрунту на знімку. Лінія може бути встановлена через визначення двох або більше еталонів оголеного ґрунту на знімку, що мають різний ступінь відбивання, та визначення найбільш придатної лінії у спектральному просторі.

Перетворення Каута-Томаса. Перетворення Каута-Томаса розроблено для аналізу змін рослинного покриву або міських територій, визначених різними системами супутникових сенсорів. Перетворення ще має назву трансформація Tasseled Cap (Шапка з китицею) через форму графічного розподілу даних.

Метод був запропонований в 1976 році Каута (R.J. Kauth) і Томасом (G.S. Thomas) з Мічиганського науково-дослідного інституту проблем навколишнього середовища, які запропонували логічне пояснення закономірностям, виявленим в даних Landsat MSS по сільськогосподарським полям, як функції життєвого циклу сільськогосподарської культури. У міру зростання сільськогосподарської культури, відбувається чистий приріст відбивної здатності в ближньої частини ІК діапазону і її зменшення в червоній області, на основі кольору ґрунту. Застосування цієї трансформації було розширено від спостережень за врожайністю до аналізу і картографування рослинності. Також, метод розширено для підтримки не тільки Landsat MSS, а й інших популярних супутникових систем, таких як Landsat TM і Landsat ETM +, IKONOS і мультиспектральних сенсорів високої розрізненості QuickBird.

Переваги перетворення Tasseled Cap включають:

1. Забезпечення аналітичного методу визначення і порівняння змін рослинності, ґрунту і штучних об'єктів протягом коротких і довгих періодів часу.
2. Забезпечення аналітичного методу прямого порівняння об'єктів земного покриву за допомогою супутникових знімків, отриманих різними сенсорами.
3. Зменшення обсягу даних з декількох мультиспектральних каналів до трьох основних компонентів: яскравість, рівень зеленого і вологість (або жовтизна покриву для Landsat MSS).
4. Зниження атмосферного впливу і перешкод на зображеннях, підвищення якості аналізу.

Перетворення Tasseled Cap - це окремий випадок аналізу головних компонент, який перетворює дані зображень в нову систему координат з новим набором ортогональних осей. Основна вісь, яскравість, обчислюється статистично як зважена сума відображень всіх спектральних каналів і визначає максимальну різноманітність на зображенні. Яскравість пов'язана з відкритими або частково прихованими ґрунтовими, штучними і природними об'єктами, такими як бетон, асфальт, гравій, оголення гірських порід і інші відкриті області. Перпендикулярно до першої компоненти знаходиться друга компонента, рівень зеленого, що пов'язана із зеленою рослинністю, тоді як третьою компонентою - вологість - розташована перпендикулярно першим двом компонентам і пов'язана з вологістю ґрунту, водними і іншими «вологими» об'єктами. Для Landsat MSS, третьою компонентою відповідає жовтизна, а не вологість, і відображає стиглі сільськогосподарські культури, готові для прибирання, а також старіння рослинності. Інші додаткові компоненти містять перешкоди на зображенні і вплив атмосфери, які були видалені з перших трьох, найбільш значущих компонент. Перші три компоненти зображення, перетвореного

за методом Tasseled Cap, містять близько 97% значимої інформації, що знаходиться на зображенні.

Kauth and Thomas (1976) описали відомий трикутний регіон у формі «шапочки з китицею» у червоному і ближньому інфрачервоному просторі даних знімальної системи MSS супутника Landsat. Вони відкрили, що найвища точка трикутника (яка лежить на ділянці низького відбивання в червоній ділянці спектра і високого – у ближньому інфрачервоному) відповідає районам з густою рослинністю, а плоска частина трикутника, що лежить навпроти кінця трикутника, відповідає ґрунту без рослинності. Перетворення «шапочка з китицею» передбачає використання яскравості пікселів не менше шести спектральних зон видимого, ближнього й середнього інфрачервоного діапазонів. Значення координат пікселів розраховується шляхом алгебраїчного зваженого додавання яскравості шести спектральних зон.

При співставленні двох різночасових знімків із значними відмінностями у гістограмах, відбувається перетворення обох або одного зі знімків, щоб мінімальні та максимальні значення яскравостей були однаковими. Таке перетворення має назву *зведення зображення до одного вигляду*. Процедура комбінування знімків для створення одного файлу зображення має назву *мозаїка*. Виконання якої пов'язано з наступними процедурами: суміщення знімків за координатами, вирівнювання їх яскравісного контрасту, задавання меж (лінії зшивання) між зображеннями в області їх перекриття, визначення значень яскравості пікселів в області перекриття, створення вихідного зображення.

Усі зображення обрані для створення мозаїки мають бути геокодовані в одній системі координат. Вирівнювання контрасту виконується шляхом перетворення гістограми зображень, що направлені на мінімізацію відмінностей між ними. Після коригування яскравості користувач аналізує область перекриття знімків та задає лінію зшивання. Зазвичай ця процедура виконується вручну, оскільки лінія може мати складну форму. Значення яскравості пікселів в області перекриття визначається декількома способами: використанням значень накладеного зображення; вирахуванням середнього значення пікселів двох зображень, мінімального чи максимального; здійсненням лінійної інтерполяції значень яскравості пікселів в області перекриття. Останнім кроком у створенні вихідного зображення є задавання його меж, які визначаються межами території або межами кадрів з'єднаних знімків.

Тема 4. РАДІОМЕТРИЧНЕ КОРИГУВАННЯ

Реставрація супутникових даних направлена на покращення їх якості та наближення до ідеального зображення. Реставрацію проводять методами геометричного та атмосферного коригування, а також компенсації зміни характеристик фотоприймача. При цьому інколи доводиться поновлювати пропущені дані, заповнювати ділянки, що закриті хмарами або не проявилися в достатній мірі тощо. Для покращення зображення його перетворюють у форму, найбільш зручну для візуального або машинного аналізу.

Виконується за допомогою процедур радіометричного та геометричного коригування. Радіометричне коригування проводять з метою виправлення радіометричних спотворень космознімка.

Радіометричне спотворення космознімка – це порушення пропорційності відтворення яскравісних характеристик об'єктів зондування на зображенні (ДСТУ 4758:2007).

Радіометричні спотворення пов'язані з несправністю детекторів, впливом рельєфу, атмосфери, та усуваються шляхом приведення так званих “сирих значень” у фізичні одиниці яскравості, виправлення дефектів зображення і впливу відмінностей освітленості. Несправності

детекторів знімання призводять до смугастості зображення. У залежності від складності несправностей смуги бувають світлого або темного кольору, такі явища називаються випаданням рядків зображення. Воно виникає коли який-небудь елементарний канал реєстрації електромагнітного випромінювання втрачає калібровку, тобто записує постійно більші або менші значення, ніж інші детектори знімальної апаратури, при зніманні тієї ж території у тій же спектральній зоні. виправлення недоліків у зображенні проводять методами просторової фільтрації. Відновлення пошкоджених рядків або ділянок вкритих хмарами здійснюється методами інтерполяції/екстраполяції яскравостей сусідніх пікселів чи комбінацією яскравостей групи пікселів статистичними методами (середньоквадратичного відхилення, розрахунок середнього значення і ін.). При цьому неможливо створити зображення пропущених об'єктів або елементів ландшафту, але відновлюється структура зображення та його розмір. Для однорідних площинних об'єктів така заміна буде близькою до ідеальної. Заміна суттєво спотвореного рядка здійснюється комбінацією значень яскравості сусідніх пікселів із використанням статистичних методів оброблення.

При використанні лінз в апаратурі оптичного знімання по краях знімків буде виникати затемнення порівняно з їх центральною частиною. Таке явище має назву **віньсткування** зображення. Дифузне відбивання сонячного випромінювання від дзеркальної поверхні знімання приводить до появи світлих відблисків у вигляді білих плям на знімку. Такі недоліки зображення усуваються за кривою затінення, яка визначається дискретним перетворенням Фур'є цифрових зображень з метою виявлення низькочастотних складових радіометричних спотворень.

Радіометричне коригування пов'язане зі зміною значень яскравості пікселів, шляхом **калібрування**.

Калібрування – кількісне визначення відгуку технічного засобу ДЗЗ на відомий вхідний сигнал. Калібрування даних – коригування даних ДЗЗ на основі використання інформації, отриманої з тестових полігонів та еталонів.

У якості тестових полігонів обирають частину поверхні Землі, яку використовують для калібрування, перевіряння та затвердження даних ДЗЗ. Перевіряння або **верифікація** даних полягає в оцінюванні відповідності даних установленим вимогам. Затвердження або **валідація** даних полягає в незалежному оцінюванні якості даних, отриманих на виході системи, відповідно встановлених вимог.

Для більшості сучасних знімальних систем калібрування проводиться на борту космічного літального апарату. У деяких знімальних системах (EOSAT, SPOT) радіометричні помилки відкориговані. Перед запуском космічних апаратів характеристики знімальних систем, зокрема мінімальні та максимальна величина випромінювання, лінійність передавання яскравостей, досліджується в лабораторіях.

Конструкція сканерів та багатозональних цифрових камер дає можливість отримувати лінійну залежність між цифровими значеннями яскравості пікселів знімка і яскравістю відповідних ділянок поверхні. Знімальні системи періодично реєструють випромінювання об'єктів, відбивальні та випромінювальні характеристики яких відомі, наприклад, свіжий сніг, білий пісок. Це дає можливість проводити радіометричні вимірювання на знімках та порівнювати значення яскравостей об'єктів на різних знімках. Для цього використовують **контрольно-калібрувальні полігони**, частини поверхні Землі з відомими характеристиками, які використовують для калібрування, перевіряння та повірки технічних засобів ДЗЗ.

Найскладнішим є коригування впливу рельєфу та атмосфери. виправлення радіометричних спотворень космознімка, зумовлених рельєфом місцевості також називають топографічним коригування космічного знімка. **Атмосферне спотворення космознімка – спотворення**

зображення, зумовлене впливом атмосфери на розповсюдження електромагнітних хвиль між технічним засобом ДЗЗ та об'єктом зондування (ДСТУ 4758:2007). При коригуванні впливу атмосфери враховують тип розсіювання в атмосфері та рівень видимості, географічне положення району і сезон проведення знімання. Враховують дані метеорологічних спостережень у день знімання та залучають матеріали наземних вимірювань відбивальної здатності об'єктів і стану атмосфери. Для виправлення похибок за рельєф та вплив геометрії знімання необхідне знання параметрів геометрії знімання, таких як, азимут і висота Сонця, кут візування та цифрова модель рельєфу, що надаються разом зі знімком.

Вимірювальна апаратура природно-ресурсних супутників Землі перед запуском ретельно перевіряється та калібрується. Однак, за час функціонування супутників на орбіті вимірювальна апаратура деградує під впливом несприятливих факторів космічного простору. Тому показання датчиків сканерів необхідно також піддавати радіометричному коригуванню.

Алгоритми коригування відбивальних характеристик об'єктів спричинених атмосферними явищами, що найчастіше використовуються у сучасних програмах оброблення такі:

- віднімання темних пікселів;
- перетворення показника енергетичної яскравості об'єкта на коефіцієнт відбивання;
- дослідження лінійних регресій;
- моделювання впливу атмосфери.

Метод віднімання значень темних пікселів полягає у припущенні, що піксел з найнижчою радіометричною яскравістю у кожній спектральній зоні має бути нулем, а його ненульове значення є результатом дії адитивних перешкод спричинених атмосферою. Процедура віднімання значення яскравості темного пікселя еквівалентна зсуву початку шкали відліку яскравості. Таке припущення дуже спрощено відображає реальність, проте його часто застосовують для усунення ефекту “атмосферного серпанку”.

Перетворення показника енергетичної яскравості об'єкта на коефіцієнт відбивання потребує знання реальної відбивної здатності, принаймні, двох об'єктів на зображенні. Вони можуть бути отримані шляхом вимірювань відбивальної здатності на місцевості, або із таблиць відбивальної здатності стандартних об'єктів. Методика такого перетворення в інструкції NASA ґрунтується на співвідношенні:

$$R_{\lambda} = \frac{L_{\lambda} d^2}{E_{s\lambda} \cos \theta},$$

де, d – відстань від Землі до Сонця в астрономічних одиницях на конкретну дату,

$E_{s\lambda}$ - середня сонячна позаатмосферна енергетична освітленість мВт/см²мкм,

$\cos \theta$ – зенітна відстань Сонця.

Значення d і $E_{s\lambda}$ беруть із довідникових таблиць, а θ – (тета) з файлу-заголовка знімка.

Методи дослідження лінійних регресій використовують побудову графіків розподілення значень яскравості у двох спектральних зонах (двовимірні гістограми). Вважається, що положення на гістограмі будь-якого пікселя визначається значенням його яскравості у двох зонах (з певною дисперсією) і утворює лінію регресії. Коефіцієнти лінійного рівняння регресії знаходять використовуючи середнє значення й дисперсію яскравості у кожній спектральній зоні. Нахил лінії регресії відображає кореляцію значень відбивальної здатності у двох спектральних зонах. За нульової яскравості лінії регресії мають пройти через початок двовимірної системи спектральних координат. Зміщення лінії регресії відносно початку координат, означає наявність радіометричної складової, що зумовлена впливом атмосфери.

Моделювання впливу атмосфери потребує знання стану атмосфери в момент знімання або використання відповідних апріорних даних. Частіше за все такі моделі потребують даних атмосферного профілю (тиск, температура, водяна пара, озон тощо), тип аерозолу, висота місця, зенітний та кут огляду датчика. Інший метод атмосферного коригування базується на можливості ідентифікації зображень об'єктів на космічному знімку з відомою або виміряною відбивальною здатністю. Використання яскравості зображень відомих об'єктів та інтенсивності сонячної радіації на момент знімання дає можливість оцінити вплив атмосфери на радіаційні параметри зображення в цілому. Однак, такий метод може використовуватись тільки в окремих місцях і за окремими об'єктами або у певний сезон.

Тема 5. ГЕОМЕТРИЧНЕ КОРИГУВАННЯ.

Геометричне коригування пов'язане з виправленням геометричних (просторових) спотворень космознімка.

Геометричне (просторове) спотворення космознімка – це неоднаковість відтворення геометричних характеристик об'єкта зондування на зображенні.

Геометричні спотворення – це помилки зображення, що полягають у розходженні між фактичними координатами елементів зображення та їх ідеальними координатами, які теоретично забезпечувались би ідеальним датчиком при ідеальних умовах.

Геометричне коригування призначене для виключення викривлень у відносному позиціюванні пікселів, що викликане кривизною та обертанням Землі, недосконалістю апаратури знімання. Інший вид спотворень на знімку виникає внаслідок неспівпадіння площини орбіти з земною віссю, а тому верхня рамка знімку не відповідає напрямку на північ, що ускладнює прив'язування знімка до карти. Проводиться геометричне коригування систематичних і несистематичних спотворень космічних знімків та комбінований метод.

Первинне – систематичне – геометричне коригування проводиться на рівні 1 В оброблення знімків і полягає у виправленні геометричних спотворень за кривизну та обертання Землі, нерівномірний рух супутника та здійснюється за орбітальними даними (орієнтацією бортової системи координат в геоцентричній системі координат, математичною моделлю спотворень).

Несистематичні геометричні спотворення усуваються на наступному рівні 2В оброблення знімків і полягають у геометричному коригуванні (трансформації) невиправлених зображень із системи координат зображення в географічну систему координат за опорними точками з використанням поліномів (багаточленів) перетворення. Вони дозволяють розрахувати координати нової сітки для пікселів вихідного зображення за координатами контрольних точок. Для збереження зафіксованої знімком яскравісної структури зображення, значення яскравості трансформованих пікселів повинні бути перевизначені у відповідності до нової сітки. Така процедура називається **ресемплінгом**.

Комбінований метод коригування застосовують з використанням градувальник характеристик датчика, його місцеположення та орієнтації, опорних точок і ін.

Дані про координатне прив'язування зберігається в заголовку файла зображення, що може бути початком запису файла або зберігатися в окремому файлі.

Кінцевою метою геометричних перетворень є представлення знімка в певній проекції та системі координат. Трансформування виконується у випадку використання знімків для створення карт або у разі співставлення різних за типом або різночасових матеріалів. Обов'язковим є перетворення даних дистанційного зондування які входять у ГІС.

Відомо, що Земля має форму кулі, але неправильної форми. Складну фігуру нашої планети, що обмежена рівнем поверхні океану називають **геоїдом**. Однак, геоїд має вкрай складну форму і її практично неможливо математично точно описати. Тому, у залежності від розв'язуваних задач, форма геоїда може апроксимуватися сферою, еліпсоїдом обертання, тривісним еліпсоїдом або, найбільше точно, квазігеоїдами.

Складність форми геоїда (як і будь-якої іншої рівневої поверхні) виникає через те, що Земля складається з нерівномірно розподілених мас різної щільності. Це приводить до того, що сила ваги на поверхні Землі в різних місцях неоднакова. Крім того, вектори сили ваги спрямовані в різні напрямки, що не сходяться в центрі мас Землі.

Загальноземним називається еліпсоїд обертання, площина екватора і центр якого збігаються з площиною екватора і центром мас Землі, і що найкраще апроксимує поверхню геоїда.

Референц-еліпсоїдом називається такий еліпсоїд, що щонайкраще апроксимує поверхню геоїда на відповідній території Землі.

Квазігеоїдом називається така фігура, що на різних ділянках поверхні Землі апроксимується різними місцевими референц-еліпсоїдами. На території морів і океанів поверхня квазігеоїда збігається з поверхнею геоїда, а на суші вона відхиляється від нього в межах двох метрів.

Найбільш точне наближення до реальної фігури Землі – дає **еліпсоїд обертання** – геометричне тіло, яке створюється при обертанні еліпса навколо його малої вісі. Уточнення розмірів земного еліпсоїду продовжується до цього часу. Необхідно врахувати геометрично правильну фігуру – референц-еліпсоїд, який найкращим чином буде наближенням до земного геоїду та відносно якого будуть виконуватися всі геодезичні вимірювання й обраховуватися картографічні проекції.

Більшість референц-еліпсоїдів є еліпсоїдами обертання, що характеризуються довжинами своїх півосей (a - відстань від його центра до точок екватора і b - відстань від центра до полюсів) і e - коефіцієнтом стиснення.

Крім своїх розмірів референц-еліпсоїди характеризуються положенням центра в тілі Землі й орієнтацією вертикальної осі. Коли для роботи на території береться деякий місцевий референц-еліпсоїд, то він вибирається так, щоб максимально точно відповідати поверхні геоїда на цій території. Саме тому даний референц-еліпсоїд може дуже сильно відрізнятись від поверхні геоїда на інших територіях.

На території нашої країни прийнято референц-еліпсоїд Ф.М.Красовського, вирахований в 1940 р. Його параметри:

велика напіввісь, що розташована в площині екватора (a) – 6 378 245 м;
мала напіввісь, що збігається з віссю обертання Землі (b) – 6 356 863 м;
стиснення $\alpha = a-b/a$ 1/298.3.

Початковий пункт у Пулкові, перевищення геоїда над референц-еліпсоїдом у початковому пункті дорівнює нулеві, а вимір висот робиться в Балтійській системі висот, що веде відлік від нуля Кронштадтського футштока. Ця система координат називається СК-42, тому що вона була розроблена в 1942 р., а з 1946 р. була введена в експлуатацію на території СРСР.

Сьогодні у світі використовують біля півтори десятки різних еліпсоїдів. За певних умов еліпсоїд замінюють кулею, площа поверхні якої дорівнює площі поверхні земного еліпсоїда. Радіус такої кулі – 6371,1 км, іноді заокруглюють до 6370 чи 6400 км.

Положення географічних об'єктів на поверхні земного еліпсоїда визначають у системі географічних координат за широтою B і довготою L . Застосовують також систему прямокутних координат, в якій положення точок визначають абсциса x і ордината y .

Координати – це числа (величини), за якими знаходять (визначають) положення будь-якого елемента (точки) з деякої їх сукупності. Множину точок може представляти площина, поверхня, простір. Сукупність координат створює систему координат.

Просторові координати – це дані про місцеположення, взаємне розташування об'єктів або поширення явищ, що представлені в певній системі координат, тобто такі дані розглядаються з точки зору їх розміщення на поверхні Землі.

Геодезична основа просторових даних визначає способи переходу від фізичної Землі до математичної поверхні (сфера, еліпсоїд обертання, площина). Перехід від математичної поверхні до площини здійснюється за допомогою картографічних проекцій, формули яких зв'язують системи координат, задані на еліпсоїді або кулі та на площині.

Координати точок тривимірного простору можуть бути перераховані в систему координат на еліпсоїді обертання та навпаки. Картографічна проекція визначає відповідність точок еліпсоїда і точок площини.

Прямокутні системи координат на площині можуть розрізнятися зсувом початку координат, поворотом координатних осей, зміною масштабу. Робота з просторовими даними вимагає знання систем координат. Часто необхідно працювати з декількома системами геодезичних і прямокутних координат у вибраній картографічній проекції. Першим кроком в організації координатного простору є визначення геодезичної основи просторових даних. При її визначенні використовують наступні координати:

- географічні;
- висоти над еліпсоїдом та висоти пов'язані з силою тяжіння Землі;
- плоскі прямокутні геодезичні;
- геоцентричні просторові прямокутні.

Географічні координати – це широта та довгота визначають положення точки на глобусі та земній поверхні. Деколи використовують третю координату – азимут, що визначає кут між напрямом на північ та напрямом на об'єкт. У залежності від того, як ці координати визначаються, виділяють групи географічних координат:

1. Астрономічні, що не потребують знань про розмір та форму Землі. Астрономічні координати визначаються відносно прямовисної лінії та осі обертання Землі без знання її розмірів і форми.
2. Сферичні, пов'язані з сферичною моделлю Землі. Сферичні координати застосовують коли Земля апроксимована однорідною фігурою сфери або кола.
3. Еліпсоїдні, визначаються на земному еліпсоїді обертання.

Системи відліку висот. У практиці використовують висоти відліку від:

- поверхні земного еліпсоїда – геодезичні висоти;
- геоїда – ортометричні висоти;
- допоміжної поверхні – квазігеоїда – нормальні висоти;
- штучної поверхні – динамічні висоти.

Геодезичні висоти розраховують по нормалям до еліпсоїда. Початок відліку на поверхні еліпсоїда, над еліпсоїдом висоти позитивні – під ним від'ємні. Ці висоти визначаються за вимірами глобальних систем позиціонування (GPS) з точністю 1-2 см.

Ортометричні висоти та висоти геоїда. Ортометричні висоти обраховуються від поверхні геоїда.

Плоскі прямокутні геодезичні координати. Ці координати вводяться за допомогою картографічних проекцій. Плоскі прямокутні координати зручні для складання великомасштабних топографічних карт та створення координатного середовища в ГІС.

Основні вимоги до геодезичної проєкції: рівнокутовість; малі викривлення в межах виділених територіальних зон; простота облікування викривлень в межах зон; мінімальна кількість зон; рівнозначність зон; можливість глобального поширення плоских координат.

Кількість геодезичних рівнокутових проєкцій не значна: азимутальна проєкція Руссиля; конічна проєкція Ламберта; поперечно-циліндрична Гаусса-Крюгера; UTM Universal Transverse Mercator.

Проєкція Гаусса-Крюгера. Система координат в проєкції Гауса-Крюгера була введена німецьким вченим Карлом Фрідріхом Гауссом (1777 – 1855) для оброблення Ганноверської триангуляції. У 1912 р. її розвинув німецький геодезист Крюгер. Проєкція визначається трьома умовами: вона рівнокутова, зберігає довжини на середньому меридіані та симетрична відносно нього. У СРСР проєкція введена у 1928 р., а з 80-х років поширена на весь масштабний ряд до 1 : 1 000 000 включно. В Україні застосовуються 6 градусні зони з довжинами середніх меридіанів 3, 9, 15°, ... Зони обмежені меридіанами і поширюються від північного полюса до південного. Перша зона обмежена меридіанами 0 та 6°, середній 3°. У кожній зоні будується своя прямокутна система координат. Ось абсцис ОХ орієнтована на північ за середнім меридіаном, ось ОУ – це перпендикулярне до осьового меридіана зображення екватора.

Для того щоб всі ординати були позитивними і однозначно визначеними, до них добавляють 500 000 м з вказівкою номера зони.

Проєкція UTM. Проєкція розроблена в 1936 р. Міжнародним союзом геодезії та геофізики. У 1947 р. вона прийнята в Збройних силах США, НАТО і іншими організаціями. Застосовуються 6-градусні зони, які обмежуються 80° на півночі та на півдні. В полярних районах використовується азимутальна стереографічна проєкція. Зони нумеруються починаючи з меридіана переміни дат: 1 зона обмежена меридіанами з довготами – 180 ° та - 174 °. Розміщення абсцис та ординат є протилежним проєкції Гаусса-Крюгера. Номера зон двох проєкцій відрізняються на 30 одиниць.

Геодезичні земні системи відліку. Координатну основу таких систем складають закріплені на місцевості пункти відповідної наземної або космічної геодезичної мережі. Сьогодні суттєва роль відводиться глобальним системам позиціонування ГЛОНАСС та GPS. Від існуючих і закріплених пунктів геодезичної мережі координати шляхом вимірювань передаються на інші пункти, які визначаються. **Вихідні геодезичні дати – це сукупність параметрів, що визначають гравітаційне поле Землі, форму і розміри земного еліпсоїда та описують зв'язок координатної системи з Землею.**

Були визначені вихідні геодезичні дати більшості країн Європи, США, Японії, а також СРСР з вихідним пунктом в Пулкові та референц-еліпсоїдом Бесселя.

Міжнародна загальноземна система ITRS. Використовується еліпсоїд GRS-80. Щорічно починаючи з 1989 р. новими методами космічної геодезії та позиціонування формується мережа пунктів. Через геодинамічні процеси координати пунктів змінюються в середньому 1-2 см на рік, тому координати пунктів постійно поновлюються.

Світова геодезична система WGS-84. Координати пунктів встановлено в 1987 р. за супутниковими вимірюваннями. У 1994 р. система поновлена за даними GPS-вимірювань. Відміни між координатами ITRS та WGS-84 складають декілька сантиметрів.

Загальноземна система “Параметри Землі-1990”. Створена в Росії без інтеграції з західними країнами, прийнята в Росії як єдина державна система координат з метою геодезичного забезпечення орбітальних польотів космічних апаратів і вирішення навігаційних задач.

Європейська координатна система ETRS є підсистемою ITRS та дуже близька до WGS-84. Система об'єднує всі геодезичні мережі Європи та країн Балтії і Турції.

Північноамериканська система вихідних дат NAD-83. Система встановлює єдину систему планових координат для США, Канади, Мексики та країн Центральної Америки. Базується на геодезичній мережі з 250 тис. пунктів, точність підвищена сучасними вимірюваннями GPS-приймачами.

Координатна основа Росії. Раніше використовувалась СК-42, використовуючи еліпсоїд Красовського, була оновлена у СК-95. Осі еліпсоїда Красовського повернуті та орієнтовані паралельно існуючим осям загальноземної координатної системи ПЗ-90.

УСК-2000. 22 вересня 2004 р. Кабінет Міністрів України прийняв постанову за № 1259 “Деякі питання застосування геодезичної системи координат” про введення з 1 січня 2007 р. нової Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000. Нова Державна геодезична референцна система координат УСК-2000 змодельована на основі GPS-спостережень, виконаних на 44 пунктах Державної геодезичної мережі України 1-го класу. Головною умовою моделювання було збереження репрезентативності картографічних матеріалів масштабу 1:10000. Окрім цього, витримувалися такі умови:

- геометричні параметри еліпсоїда повинні збігатися з параметрами раніше прийнятого референц-еліпсоїда;
- осі координат нової референцної системи повинні бути паралельними до осей координат загальноземної (геоцентричної) системи ($E_x = E_y = E_z = 0$);
- метрика геодезичної референцної системи повинна відповідати матриці загальноземної системи (масштабний множник повинен дорівнювати 1 або $m = 0$);
- система координат повинна бути оптимально наближеною до існуючої системи координат;
- координати референцної системи повинні бути такої ж точності, як і точність визначення взаємного положення пунктів у загальноземній системі, яка побудована методами космічної геодезії.

Картографічна проекція встановлює функціональну залежність між координатами точок поверхні земного еліпсоїда та його зображення на площині (іншій поверхні). Елементами математичної основи також є геодезична основа і масштаб.

Картографічна проекція є математично визначеним відображенням поверхні земного еліпсоїда або кулі на площині. Проекція визначає однозначне співставлення між геодезичними координатами крапки (широтою B) і довжиною (L) та їх прямокутними координатами (X , Y) на карті. Рівняння проекцій виглядає просто: $X=f_1(B,L)$; $Y=f_2(B,L)$, де X та Y – прямокутні координати зображувальної точки, B та L – географічні (геодезичні) координати.

Кількість можливих функціональних залежностей, а отже і проекцій необмежена. Головним в теорії картографічних проекцій є аксіома – будь-яку сферичну поверхню земної кулі не можна розвернути на площині карти без спотворень.

Растрові зображення в електронному вигляді, зокрема скановані карти, аерокосмознімки, не дають реальної уяви про місцезорозташування, взаємне положення та розміри відображуваних ділянок. Отже, крім виправлення геометричних спотворень на знімку необхідно проводити геометричне трансформування зображення в задану систему координат картографічної проекції, що необхідно для прив'язування знімку до території чи карти. Розрізняють два види геометричного трансформування:

- **ректифікація** – зміна сітки рядків і стовпчиків піксельного зображення у відповідності з вибраною проекцією та системою координат;

- **реєстрація** – зміна сітки первинного зображення у відповідності з сіткою еталонного зображення.

Трансформування зображення – це процес перетворення зображення з метою приведення його до заданого масштабу та проекції з усуванням зміщень через нахил вісі зйомки (аерознімки), рельєфу місцевості та кривизни поверхні Землі, а також з виключенням геометричних викривлень.

При виконанні прив'язування та трансформування зображення можна виділити чотири основних етапи:

- 1) вибір геометричної моделі трансформування;
- 2) задавання опорних точок;
- 3) перетворення координат зображення на основі обраної геометричної моделі;
- 4) трансформування растрового зображення у відповідності з перетвореними координатами (створення нової сітки пікселів).

Вибір геометричної моделі трансформування залежить від виду перетворення (зсув, поворот, вимір розмірів, зміна проекції тощо).

Прив'язування зображення полягає в точній ідентифікації відображуваної ділянки місцевості земної поверхні та присвоєння кожній точці зображення реальних координат, які співпадають з координатами даної точки на місцевості. Операцію виправлення геометричних спотворень виконують за допомогою опорних точок. Загалом на зображенні знаходять точки, які пов'язані з будь-якими об'єктами, координати яких відомі. Для отримання координат опорних точок можна використовувати топографічні карти або глобальну систему позиціонування (ГЛОНАС, GPS). Чим більше точок, тим точніше прив'язування та трансформування зображення. Як правило, обирають точки на перетині доріг, чіткі контури окремих будівель, геодезичні знаки тощо. Не слід використовувати точки мінливих явищ, таких як берегові лінії, конури рослинності і ін.). Опорні точки повинні бути рівномірно розташованими на зображенні, що підвищить якість трансформування. У разі використання еталону його масштаб має співпадати або бути близьким до зображення і не відрізнятися більше ніж у 2-4 рази.

Перетворення координат зображення відбувається на основі обраної геометричної моделі: *афінне перетворення, метод гумового аркуша, поліноміальна трансформація.*

Афінне перетворення основний вид лінійних перетворень, таких як зсув, поворот, дзеркальне відображення. Застосовують для перетворення невеликих ділянок зображення і може бути корисним перед вибором контрольних точок. Афінні перетворення виконують поліномами першого порядку.

При застосуванні методу гумового аркуша задані опорні точки зображення є фіксованими і не змінюють свої координати у процесі трансформування. Положення інших точок розраховується на основі інтерполяції координат.

При невизначених властивостях зображення їх геометричне трансформування здійснюється за допомогою *поліномів перетворення*. У якості геометричної моделі обирають поліноміальну (апроксимаційну) геометричну модель, яка використовує для прив'язування та трансформування зображення методи апроксимації координат поліномами різних порядків. Метод поліноміального перетворення засновано на обрахунку трансформаційної матриці коефіцієнтів, які використовуються для апроксимації координат опорних точок поліномами різних порядків і визначення положення всіх точок зображення. Основна мета поліноміального перетворення полягає у визначенні такого апроксимуючого полінома, який би забезпечив найменше відхилення координат опорних точок зображення від заданих. Для вирішення задач трансформування використовуються поліноми різних порядків. Частіше використовують поліноми першого та другого порядків. Поліном третього порядку може бути застосований для значно спотворених

зображень. Апроксимація першого порядку дозволяє здійснювати перетворення координат і працювати з зображеннями, що описують невеликі ділянки (без врахування кривизни земної поверхні). Апроксимація поліномами другого порядку дозволяє трансформувати проєкції зображень з систем довгота/широта в топографічні та навпаки, і працювати з більшими ділянками земної поверхні (з врахуванням кривизни). Поліноми третього порядку використовують для дефектних знімків, сканованих карт із дефектами і для поліпшення радарних зображень. Поліноми четвертого порядку використовують рідко, у разі дуже спотворених зображень.

Чим вищий порядок апроксимації полінома, тим точніше оброблення зображення, але тим більше необхідно опорних точок. Мінімальна кількість точок при апроксимації поліномом першого порядку – 3, поліномом другого порядку – 6, поліномом третього порядку – 10. Для забезпечення достатнього рівня точності необхідна кількість точок, що дорівнює подвоєній мінімальній кількості.

Перед здійсненням процедури трансформування оцінюються геометричні похибки трансформування, оцінюються середньоквадратичні відхилення та порівнюються з допустимим. Середньоквадратична похибка – це величина відхилення координат, що обраховується як відстань між цими точками. В ідеальному випадку координати ретрансформованих (після трансформування) точок повинні співпадати з координатами точок на первинному зображенні, $u'_k = u_k$, $v'_k = v_k$. Для оцінювання похибок для кожної контрольної точки розраховується середньоквадратичне відхилення за формулою:

$$\sigma_k = \sqrt{(u'_k - u_k)^2 + (v'_k - v_k)^2}$$

Середньоквадратична похибка виражається в одиницях координат вихідного зображення, частіше – в пікселях. Вважається, що розмір похибки є еквівалентним величині радіусу оточення кожної контрольної точки, в межах його ретрансформовані координати розглядаються коректними. Наприклад, якщо σ_k дорівнює 2, то положення ретрансформованого пікселя, що відхиляється від вихідного положення на 2 пікселя, вважається точно локалізуючим. Якщо похибки трансформування не задовольняють вимогам, то здійснюється ітераційна процедура покращення значень, шляхом:

- виключення контрольної точки з найбільшою середньоквадратичною похибкою;
- встановлення нових допусків похибок;
- збільшують порядок трансформування;
- залишають лише ті опорні точки, відносно яких є найбільша впевненість, навіть якщо їх число буде мінімальним.

Наступною процедурою в трансформуванні зображення є **ресемплінг - перевизначення яскравості пікселів у новій системі координат та створення нового файлу, зі збереженням яскравісної структури вихідного зображення**. Необхідність перевизначення яскравості пікселів у новій системі координат пов'язана з не співпадінням сіток первинного зображення та еталонного, і як наслідок не співпадіння розташування пікселів на трансформованому зображенні по відношенню до первинного. Тобто ділянки рівні за площею (на місцевості) описуються різною кількістю пікселів на вихідному і трансформованому зображенні. Виникає ситуація коли точка центру пікселя на вихідному зображенні на трансформованому виникає на краю пікселя або на його границі, що ускладнює передавання яскравісних значень пікселів.

Для надання відповідних значень яскравості трансформованим пікселям в програмах оброблення зображень застосовують наступні **методи інтерполяції: метод найближчого сусіда; метод білінійної інтерполяції; метод кубічної інтерполяції**.

Метод найближчого сусіда є самим простим і швидким методом трансформування. При цьому піксель трансформованого зображення отримує значення найближчого до його ретрансформованих координат пікселя вихідного зображення. Похибка не перевищує половини розміру пікселя. Метод має ряд переваг перед іншими методами, оскільки при його застосуванні передаються оригінальні значення пікселів без їх усереднення, тобто зберігається первинні значення яскравості знімку, його екстремальні значення та слабо розрізнявальні значення яскравості. Метод підходить для трансформування тематичних растрових даних, в яких зображення в пікселях передає якісні характеристики. Однак слід обмежити застосування методу при перерахуванні значень із сітки координат більшого розміру в сітку координат меншого, через можливе зникнення пікселів або їх дублювання, виникнення розривів ліній.

Метод білінійної інтерполяції передбачає використання значення чотирьох пікселів вихідного зображення (2×2), найбільш близьких до точки, що відповідає координатам пікселя трансформованого зображення, значення якого знаходять. При цьому розраховується відстані між місцезположенням ретрансформованої координати пікселя і чотирма найближчими пікселями вихідного зображення. Перевага цього методу полягає в отриманні більш згладженого зображення в результаті трансформації, відсутності ефекту ступінчастості діагональних та кривих ліній, більша просторова точність. Метод білінійної інтерполяції використовують при суміщенні різномасштабних знімків, що отримані різними способами знімання. Також метод є ефективним при зміні розмірів пікселя, тобто при зміні розрізненості зображення.

Метод кубічної інтерполяції виконується аналогічно методу білінійної інтерполяції, але використовують яскравість 16-ти навколишніх пікселів вихідного зображення (4×4). При цьому середнє значення і стандартне відхилення значень пікселів вихідного і трансформованого зображення будуть меншими ніж для інших методів, і зберігається чіткість зображення. Недоліки методу пов'язані зі складністю обрахунків і витратою більше часу на оброблення, а також значення деяких пікселів можуть значно змінитися.

Тема 6. Контрольована класифікація космознімків

З теорії розпізнавання образів. Математичною основою автоматизованої класифікації є теорія розпізнавання образів.

Розпізнавання образів – розділ інформатики, що розробляє принципи й методи класифікації та ідентифікації предметів, явищ, процесів, сигналів, ситуацій, які можуть бути описані кінцевим набором ознак і властивостей, що характеризують об'єкт.

Два типи завдань, що вирішуються на основі багатомірного вектору ознак об'єкта:

1. Таксономія – розподіл існуючих для розпізнавання об'єктів на групи, на основі опису їх ознак. Кількість груп може бути визначеною чи невизначеною.
2. Розпізнавання – визначення класу опису ознак об'єкта розпізнавання.

Кількість класів може бути кінцевою або заданою.

Існує два підходи до навчання: *індуктивне* і *дедуктивне*.

Індуктивне навчання, або навчання за *прецедентами*, засноване на виявленні загальних властивостей об'єктів на підставі неповної інформації, отриманих емпіричним шляхом.

Дедуктивне навчання передбачає формалізацію знань експертів у вигляді баз знань (експертних систем тощо).

Прецедент — це об'єкт, приналежність якого до заданого класу визначена заздалегідь.

Кожний образ це набір чисел, що описують його властивості і називаються *ознаками*.

Упорядкований набір ознак об'єкта називається *вектором ознак*. Вектор ознак — це точка в *просторі ознак*.

Класифікатор, або вирішальне правило — це функція, яка ставить у відповідність вектору ознак образу клас, до якого він належить. Задачу розпізнавання образів можна розділити на ряд підзадач.

1. *Генерування ознак* — вимірювання або обчислення числових ознак, що характеризують об'єкт.

2. *Вибір ознак* — визначення найбільш інформативних ознак для класифікації (в цей набір можуть входити не лише первинні ознаки, але й функції від них).

3. *Побудова класифікатора* — конструювання вирішального правила, на підставі якого здійснюється класифікація.

4. *Оцінка якості класифікації* — обчислення показників правильності класифікації (точність, чутливість, специфічність, помилки першого та другого роду).

Правило прийняття рішення (класифікатор) про належність даного зображення або його фрагменту до одного з класів будується на основі розбивання простору ознак на множину класів, що не перетинаються.

Класифікація – автоматизований розподіл всіх пікселів знімка на групи, які відповідають різним об'єктам (класам), загалом за спектральними ознаками, тобто на основі відмін у значеннях спектральної яскравості.

Основним у класифікації є правильний вибір ознак. Способи класифікації залежать від того, як виділяють і обмежують область значень яскравості класу.

Способи класифікації за використанням розподілу значень яскравості ділять на *непараметричні та параметричні*.

У групі *непараметричних* способів розподілення значень яскравості всередині класу не враховується і не описується ніякими параметрами. Цей розподіл може бути неоднорідним, клас може включати довільне скупчення сполучень спектральних яскравостей.

У *непараметричних* способів два основних застосування. По-перше, їх використовують для дуже простих класифікацій, коли необхідно розрізнити 2-4 контрастних за яскравістю об'єктів. По-друге, їх застосовують в складних випадках, коли класи тісно розподілені в просторі спектральних ознак і внутрішньо неоднорідні, через що неможливе застосування параметричних способів.

Друга група включає *параметричні* способи класифікації, при яких розподіл значень спектральної яскравості всередині класу відповідає певному закону.

Майже завжди використовують закон нормального (гаусова) розподілу. Для нього є характерним симетричний розподіл значень яскравостей навколо середнього значення, безперервність і переважання малих відхилень від середнього.

Чим більше параметрів у класифікації, тим краще розрізняються класи, близькі за значеннями яскравості, однак тим більше машинного часу необхідно для її виконання.

Параметричні методи застосовують для класифікацій середньої й високої складності з помірною кількістю класів (від 3 до 100), всередині яких значення яскравості розподіляються відповідно нормального закону.

При розробці алгоритмів класифікації використовують два підходи: *детермінований та статистичний*. Детермінований підхід застосовують коли класи об'єктів не перетинаються в просторі ознак. Найбільш широкого застосування набув статистичний підхід, при якому

дозволяється враховувати варіації ознак і можливість віднесення пікселів до “чужих” класів, якщо частота їх появи відносно мала.

Способи класифікації за характером реалізації. Виділяють способи комп’ютерної класифікації з навчанням (*контрольована*) та без навчання (*неконтрольована*).

Суть *контрольованої класифікації* полягає у віднесенні кожного з пікселів знімка до певного класу об’єктів на місцевості. Класифікація включає декілька етапів:

1. Перший етап полягає у визначенні, які класи об’єктів будуть виділені в результаті виконання всієї процедури.
2. На другому етапі для кожного з класів об’єктів обираються типові для нього піксели, тобто формується навчальна вибірка.
3. Третій етап – вирахування параметрів “спектрального образу”, що сформовано в результаті набору еталонних пікселів.
4. Четвертий етап – процедура класифікації – перегляд всього зображення і віднесення кожного з пікселів до певного класу.

Формування навчальної вибірки. У способах класифікації з навчанням використовують попередньо визначені людиною еталонні ділянки спектральної яскравості об’єктів. У інтерактивному задаванні цих значень і складається навчання. У процесі класифікації значення яскравості пікселя порівнюють з еталонним і піксел відноситься до найбільш придатного класу об’єктів. Якість навчання можна оцінити за правильністю класифікації еталонних ділянок – в цьому полягає контроль.

Навчальні вибірки, які називають еталонами об’єктів – це набори пікселів, які представляють образ розпізнавання та слугують його ідентифікації. Це певна ділянка земної поверхні, якій відповідає ділянка в пікселях на знімку, яка ідентифікується на основі істинних даних про поверхню.

Умовою проведення навчальної вибірки є наявність на знімку еталонних ділянок, тобто фрагментів зображення, об’єкти яких однозначно віднесено до певного класу. Джерелами, на основі яких виконується вибір еталонів, є матеріали польових робіт, карти, віддешифровані аерознімки. Якість навчальної вибірки впливає на точність класифікації. Основною вимогою до даних навчальних вибірок є їхня **репрезентативність**:

- піксели мають відповідати одному класу на місцевості;
- клас повинен займати територію, яка достатньо добре представлена пікселями на знімку.

Для вибору навчальних вибірок використовують різні способи:

1. Використовують набір сусідніх пікселів з близькими спектральними характеристиками;
2. Визначення області зображення – ідентифікація пікселів у деякій області;
3. Використання класу з тематичного растрового шару в ГІС, яка відповідає області знімка;
4. Використання векторного шару, накладеного на знімок.

Процес класифікації цифрового знімка проходить попіксельно, кожний піксел відноситься до того чи іншого класу. Однак у більшості випадків кінцевим результатом класифікації є отримання деяких виділів, наприклад, рослинності чи ґрунтів, що призводить до просторового згладжування, усереднювання значень яскравості в межах класу, для чого і обирається група пікселів.

Результатом роботи алгоритмів з навчанням є карта класифікації – зображення, на якому пікселям замість вихідних значень яскравості надані значення класів об’єктів. Карта класифікації

має наперед визначену легенду. Алгоритм з навчанням використовують коли є достовірні наземні дані, не дуже багато класів об'єктів (до 30) і вони чітко розрізняються на знімку.

Оцінювання характеру розподілу значень яскравості об'єктів на знімку зручно у просторі спектральних ознак. *Простір спектральних ознак* – це графічне представлення співвідношення спектральних яскравостей знімка в найбільш інформативних спектральних зонах, наприклад, червоною ближньої інфрачервоної. Точка в двовимірному просторі спектральних ознак визначена двома значеннями (x,y). Природний об'єкт тут виглядає як група точок, оскільки спектральні яскравості кожного об'єкта зазвичай варіюють в деяких межах. Простір ознак може бути двовимірним або багатовимірним, в залежності від кількості порівнювальних спектральних діапазонів.

Важливим етапом класифікації є обрання способу класифікації, або правила, відповідно до якого, здійснюватиметься розподіл пікселів зображення на класи. Основними способами класифікації є способи: спектрального кута, мінімальної відстані, паралелепіпедів, максимальної правдоподібності, дистанції Махаланобіса та бінарне кодування.

Спосіб спектрального кута. При класифікації способом спектрального кута:

- 1) попередньо створюють еталонні ділянки;
- 2) всі пікселі знімка, в тому числі еталонні розглядаються як вектори в просторі спектральних ознак;
- 3) задається максимально допустимий спектральний кут, тобто, якщо кут між еталонним вектором і вектором пікселя, який піддається класифікації менше максимального, то цей піксел відноситься до даного класу, якщо більше не відноситься.

Класи, отримані способом спектрального кута, залежать від кута між векторами яскравості пікселів і не залежать від довжини вектора (значення яскравості). Спосіб спектрального кута дає хороші результати, коли потрібно провести класифікацію для об'єктів, які мають схожі значення яскравості. Спосіб не враховує значення яскравості пікселів, тому на результати не впливають ефекти засвічування знімків.

Спосіб паралелепіпедів. Спосіб паралелепіпедів застосовують, коли області значень яскравостей об'єктів не пертинаються, а класів об'єктів небагато. У просторі спектральних ознак виділяють області у вигляді паралелепіпеда, який обмежує значення яскравості даного класу. Значення спектральної ознаки пікселя порівнюють з граничним для кожного класу і відносять до відповідного класу об'єктів. Ті піксели, що не попали в жодний клас, відносять до не класифікованих об'єктів. Переваги способу – простота та швидке виділення класів. Часто сполучають з більш складними способами. Спосіб є параметричним.

Спосіб мінімальної відстані застосовують, коли області значення яскравості перетинаються. Цей спосіб використовують, коли спектральні ознаки різних класів схожі, і діапазони значень їх яскравостей перекриваються. Сутність способу – попередньо визначені середні значення яскравості класів є центрами, що притягують піксели з найбільш близькими значеннями яскравості. Близькість за яскравістю розраховується для всіх спектральних зон. Спектральну відстань розраховують, і порівнюють піксели з нею. Не класифікованих пікселів не залишається. Цей спосіб застосовують в особливо складних випадках, коли області значень яскравості різних класів в просторі ознак перекриваються і мають складну (або витягнуту) форму.

Спосіб максимальної правдоподібності. Розраховує ймовірність, з якою даний піксел належить до будь-якого класу. Кількість і параметри класів задаються користувачем, шляхом вказівки навчальних вибірок. Кожен піксел відноситься до того класу, до якого він може належати з найбільшою ймовірністю. При розрахунку ймовірності враховується яскравість пікселя і

яскравості оточуючих його пікселів. У двовірному просторі спектральної яскравості, отримані таким способом класи, описуються еліпсами, а в багатовірному - еліпсоїдами.

Якщо на знімку всі пікселі потрібно розділити на два класи, наприклад, вода-суша, можна використовувати метод *бінарного кодування*. При бінарному кодуванні всім пік селам присвоюється одне з двох значень на основі порівняння зі значеннями еталонних вибірок. Під час класифікації значення кожного пікселя порівнюються із середнім еталонної вибірки. У результаті виходить бінарне зображення.

Тема 7. Неконтрольована класифікація космознімків

Класифікації без навчання це процес, при якому розподіл пікселів зображення відбувається автоматично, на основі аналізу статистичного розподілу яскравості пікселів. Слід зазначити, що перед початком класифікації невідомо скільки, і яких об'єктів є на знімку, а після проведення класифікації необхідно дешифрування отриманих класів, щоб визначити, яким об'єктам вони відповідають. Таким чином, класифікацію без навчання застосовують у разі якщо:

- а) заздалегідь невідомо які об'єкти є на знімку;
- б) на знімку велика кількість об'єктів (більше 30) зі складними межами;
- в) також можна застосовувати, як попередній етап перед класифікацією з навчанням.

У способах класифікації без навчання (кластеризація) на початку проводиться автоматичне розділення пікселів на групи. Вихідна інформація, що задає дешифрувальник є мінімальною:

- кількість класів;
- відмінність їх між собою за значеннями яскравості;
- параметри, що встановлюють тривалість класифікації.

Алгоритм швидкого виділення класів. У способах класифікації без навчання (кластеризація) методом **К-середніх** на початку проводиться автоматичний поділ пікселів на групи. Вихідна інформація, яку задає дешифрувальник, є мінімальною:

- кількість класів;
- відмінність їх між собою за значеннями яскравості;
- параметри, що встановлюють тривалість класифікації.

Аналіз цифрового знімку відбувається за рядками, попередньо задається значення порогової величини, тобто граничної відстані від пікселя до центру кластера, та середнього квадратичного відхилення. У якості центру першого кластеру обирається перший елемент рядка. У подальшому обраховується відстань від цього центру до наступного пікселя у рядку. Ця відстань порівнюється з обраним порогом. Якщо відстань від аналізованого пікселя до центра першого кластеру менше порогового значення, то піксел відноситься до сформованого кластеру, центр якого перераховується, тобто обчислюється середнє з двох значень. У іншому випадку формується новий кластер, а другий піксел стає його центром. При аналізі кожного чергового рядка враховуються результати перегляду попередніх рядків і в якості центрів кластерів задаються отримані попередньо координати. Так послідовно переглядаються всі піксели знімка та формуються кластери, іменами яких є порядкові номери. На отриманому зображенні кількість виділених кластерів залежить від обраного порогового значення: чим воно менше, тим більша кількість кластерів буде виділено.

Ітераційний алгоритм послідовної кластеризації. Метод класифікації без навчання **ISODATA** (ітераційна самоорганізована методика аналізу даних). ISODATA це процес, який заснований на кластерному аналізі. До одного класу належать піксели, значення яскравості яких найбільш близькі в просторі спектральних ознак.

Частіше неконтрольована класифікація виконується в два етапи: на першому використовують алгоритм швидкого виділення кластерів, на другому – ітераційний алгоритм послідовної кластеризації. На відміну від першого другий етап потребує задавання кількості кластерів, значень їх центрів або число ітерацій.

Перший крок полягає у віднесенні пікселів до одного з кластерів. У якості критерію може бути обрано мінімальну відстань до центра кластера. Другий крок – вирахування положення центру кластера з врахуванням віднесених до нього пікселів. Задача вважається вирішеною якщо координати центрів співпадуть із заданими. У іншому випадку виконується друга ітерація і знову вираховується положення центрів кластерів. Критеріями якості кластеризації є значення середньоквадратичних відхилень відстаней від центру кластера до кожної включеної до нього точки і сума цих відхилень для всіх кластерів. Процес продовжується до досягнення заданих значень числа кластерів або середньоквадратичного відхилення або до виконання заданої кількості ітерацій.

На першому етапі зображення поділяють на масиви схожих за спектральними характеристиками пікселів – кластери. Потім порівнюються характеристики кластерів з характеристиками реальних географічних об'єктів і визначається до яких об'єктів відноситься кластер. Отримана карта класифікації більш об'єктивно відбиває близькі за значенням дешифрувальних ознак групи об'єктів, оскільки кластери визначаються автоматично. Легенда, навіть після визначення об'єктів потребує подальшого редагування (об'єднання або розбиття класів).

Обидва способи доповнюють один одного і часто їх сполучають у рамках гібридної класифікації.

Список основних використаних джерел

1. Білоус В.В., Боднар С.П., Курач Т.М., Молочко А.М., Патиченко Г.О., Підлісецька І.О. Дистанційне зондування з основами фотограмметрії: навчальний посібник К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2011. – 367 с.
2. Кохан С.С., Востоков А.Б. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: Підручник/Передм. Д.О.Мельничука. – К.: Вища шк., 2009. – 511 с.
3. Лурье И.К., Косиков А.Г. Теория и практика цифровой обработки изображений. М.: Научный мир, 2003. – 168 с.
4. Лурье И.К., Косиков А.Г., Ушакова Л.А. и др. Компьютерный практикум по цифровой обработке изображений и созданию ГИС. М.: Научный мир, 2004. – 148 с.
5. Лялько В.І., Попов М.О., Федоровський О.Д. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі. – К.: Наукова думка, 2006. – 357 с.
6. Манойлов В.П., Омельчук В.В., Опанюк В.В. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 384 с.
7. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
8. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М. Техносфера, 2010. – 560 с.
9. Oihao Weng, Series Editor Remote sensing of impervious surfaces. CRC Press, 2008.
10. John J. Qu, Wei Gao, Menas Kafatos, Robert E. Murphy, Vinsent V. Salomonson Earth Science Satellite Remote Sensing, vol.2: Data, Computational Processing, and Tools. Tsinghua University Press, 2006.