УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Будівельний факультет

Кафедра вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою

Використання геоінформаційного моніторингу сільськогосподарських угідь для оптимізації землекористування

Пояснювальна записка

до випускної кваліфікаційної роботи бакалавра

ВПГЗ. 301.193.2026.ПЗ.

Розробив: здобувач освіти групи 103-ГЗ-Д22
Галаган Михайло Ілліч
Спеціальність: 193 Геодезія та землеустрій
(роботу виконано самостійно, відповідно до принципів академічної доброчесності)

Керівник: асистент Сорочук Н.І.

Нормоконтроль: к.т.н., доц. Орел Є.Ф.

Зав. кафедри: д.т.н., проф. Угненко Є.Б.

Рецензент: директор МПП «Автодорсервіс»,
к.т.н., доцент кафедри будівництва
та цивільної інженерії Луцького
національного технічного університету
Процюк В.О.

2026

ВПГЗ

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет будівельний
Кафедра вишукувань та проєктування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою
Освітній рівень: бакалавр
Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, доктор техн. наук
_____ Є.Б. Угненко
«_____»_____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Галагана Михайла Ілліча

1. Тема проекту «Використання геоінформаційного моніторингу сільськогосподарських угідь для оптимізації землекористування» керівник роботи Сорочук Наталія Ігорівна затверджені розпорядженням по будівельному факультету від «18» травня 2026 року № 5.
2. Строк подання студентом закінченої роботи – «15» червня 2026 року
3. Вихідні дані до проекту (роботи): характеристика об'єкта зйомки; картографічні матеріали; мультиспектральні супутникові знімки; часові серії знімків; цифрова модель рельєфу (ЦМР); цифрові векторні файли з координатами меж полів; дані про цільове призначення з Державного земельного кадастру; дані ґрунтових обстежень і сівозмін; методики проведення моніторингу та вимоги до якості ґрунтів; шкала інтерпретації індексів; нормативно-довідкова інформація.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1. Теоретико-методологічні основи ГІС-моніторингу сільськогосподарських угідь. 2. Методи цифрової обробки космічних знімків. 3. Спектральне дешифрування рослинного покриву. 4. Оцінювання стану рослинності з використанням багатоспектральних космічних даних дистанційного зондування Землі. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): мета і завдання, актуальність теми, об'єкт і предмет дослідження; структура системи дистанційного зондування Землі; робочі спектральні канали системи Landsat; сенсори системи Landsat 8; отримання космічних знімків території дослідження; характеристика космічних знімків території дослідження; радіометричне калібрування та "зшивання" зображень; атмосферна корекція зображень; вегетаційні індекси; NDVI (Normalized Difference Vegetation Index); обчислення NDVI; висновки.

ВІЗ

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «18» травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1 Вступ.	20.05.2026 р.	виконано
2 Теоретико-методологічні основи ГІС-моніторингу сільськогосподарських угідь.	25.05.2026 р.	виконано
3 Методи цифрової обробки космічних знімків	30.05.2026 р.	виконано
4 Спектральне дешифрування рослинного покриву	07.06.2026 р.	виконано
5 Оцінювання стану рослинності з використанням багатоспектральних космічних даних дистанційного зондування Землі	10.06.2026 р.	виконано
6 Висновки	14.06.2026 р.	виконано
7 Оформлення роботи	15.06.2026 р.	виконано

Здобувач освіти _____ Михайло ГАЛАГАН

Керівник проекту (роботи) _____ Наталія СОРОЧУК

ВТЕ

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота містить 17 слайдів презентації, 107 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 28 рисунків, 9 таблиць, 45 літературних джерел.

Ключові слова: ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ, СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ УГІДДЯ, ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ.

Об’єктом дослідження є процес моніторингу та управління станом сільськогосподарських угідь із використанням сучасних інформаційних технологій. Предмет дослідження: методика геоінформаційного моніторингу для аналізу стану вегетації та розробки заходів з оптимізації структури землекористування.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та практична реалізація системи геоінформаційного моніторингу сільськогосподарських угідь для підвищення ефективності використання земельних ресурсів та оптимізації господарської діяльності.

У кваліфікаційній роботі розглянуто методологічні основи ГІС-моніторингу сільськогосподарських угідь. Досліджено методи цифрової обробки геопросторових даних.

Розглянуті питання спектрального дешифрування рослинного покриву. Проведено оцінку стану рослинності використанням багатоспектральних космічних даних дистанційного зондування Землі. У ході роботи розроблено рекомендації щодо оптимізації землекористування на основі ГІС-даних.

ABSTRACT

This qualification work includes 17 presentation slides, 107 pages of A4 explanatory note, including 28 figures, 9 tables, 45 references.

Keywords: GEO-INFORMATION MONITORING, REMOTE SENSING OF LAND, AGRICULTURAL LANDS, LAND USE.

The object of the study is the process of monitoring and managing the state of agricultural lands using modern information technologies. Subject of the study: geoinformation monitoring methodology for analyzing the state of vegetation and developing measures to optimize the structure of land use.

The purpose of the work is the theoretical justification and practical implementation of the geoinformation monitoring system of agricultural lands to increase the efficiency of land resource use and optimize economic activity.

The qualification work considers the methodological foundations of GIS monitoring of agricultural lands. Methods of digital processing of geospatial data are studied.

Issues of spectral decoding of vegetation cover are considered. An assessment of the state of vegetation is carried out using multispectral space data of remote sensing of the Earth. In the course of the work, recommendations for optimizing land use based on GIS data are developed.

РЕПОЗИТОРІЙ

Зміст

Вступ 6

1 Теоретико-методологічні основи ГІС-моніторингу сільськогосподарських угідь 9

1.1 Поняття та складові моніторингу земель сільськогосподарського призначення 9

1.2 Роль ГІС-технологій та дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у сучасному землеустрої 12

1.3 Огляд нормативно-правової бази та державних стандартів моніторингу земель в Україні 15

1.4 Світовий досвід використання ГІС для оптимізації використання земельних ресурсів 18

2 Методи цифрової обробки космічних знімків 21

2.1 Основні відомості про дистанційне зондування Землі 21

2.2 Отримання космічних знімків та їх основні характеристики 25

2.3 Цифрова обробка аерокосмічних зображень 31

2.4 Методи цифрової обробки космічних знімків 37

3 Спектральне дешифрування рослинного покриву 45

3.1 Поняття про спектральну яскравість природних об’єктів 45

3.2 Спектральна відбивальна здатність рослин 52

3.3.Основні методи перетворення вихідних спектральних ознак 57

ВПГЗ

Затв.	Угненко				

4 Оцінювання стану рослинностіз використанням багатоспектральних космічних даних дистанційного зондування Землі 79

4.1 Дослідження рослинності на основі вегетаційних індексів 79

4.2 Отримання та інтерпретація космічних знімків системи Landsat 81

4.3 Попередня обробка космічних знімків Landsat 91

Висновки 101

Список використаних джерел 103

ВІТЗ

Вступ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку економіки України аграрний сектор залишається стратегічно важливою галуззю, що потребує впровадження інноваційних підходів до управління земельними ресурсами. Традиційні методи моніторингу сільськогосподарських угідь, що базуються переважно на наземних обстеженнях, є занадто вартісними, тривалими в часі та не завжди забезпечують необхідну оперативність. У зв'язку з цим цифровізація агросектору стає критичною необхідністю.

Використання геоінформаційних систем (ГІС) у поєднанні з даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє здійснювати безперервний контроль за станом посівів, виявляти деградаційні процеси на ранніх стадіях та оперативно реагувати на зміни вегетаційного покриву. Оптимізація землекористування на основі ГІС-моніторингу дає змогу не лише підвищити врожайність, а й забезпечити раціональне використання ґрунтового потенціалу, що є надзвичайно актуальним в умовах зміни клімату та зростання антропогенного навантаження на ландшафти.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та практична реалізація системи геоінформаційного моніторингу сільськогосподарських угідь для підвищення ефективності використання земельних ресурсів та оптимізації господарської діяльності.

Завдання роботи:

1) вивчити методологічні основи ГІС-моніторингу сільськогосподарських угідь;
2) проаналізувати методи цифрової обробки геопросторових даних;
3) розглянути питання спектрального дешифрування рослинного покриву;
4) оцінити стан рослинності використанням багатоспектральних космічних даних дистанційного зондування Землі;
5) розробити рекомендації щодо оптимізації землекористування на основі ГІС-даних.

ВІТЗ

Об'єктом дослідження є процес моніторингу та управління станом сільськогосподарських угідь із використанням сучасних інформаційних технологій.

Предметом дослідження є методика та інструментарій геоінформаційного моніторингу для аналізу стану вегетації та розробки заходів з оптимізації структури землекористування.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у роботі використано комплекс наукових методів:

• системного аналізу — для вивчення структури землекористування;

• картографічного моделювання — для візуалізації просторових даних та створення тематичних карт;

• дистанційного зондування — для отримання оперативної інформації про стан біомаси (розрахунок індексів NDVI, EVI);

• статистичного аналізу — для обробки кількісних показників зміни стану вегетації;

• порівняльно-географічний метод — для оцінки динаміки змін у часі.

Практичне значення результатів полягає у розробці конкретних пропозицій щодо вдосконалення структури посівних площ та виявлення ділянок, що потребують особливої уваги (рекультивації, консервації або зміни агротехніки). Створені в ході роботи цифрові карти та бази геопросторових даних можуть бути інтегровані в системи управління агропідприємств або використані органами місцевого самоврядування для прийняття управлінських рішень у сфері земельних відносин.

Теоретико-методологічний фундамент ГІС-моніторингу сільськогосподарських угідь будується на інтеграції географічних знань, методів дистанційного зондування та цифрових алгоритмів обробки даних. У центрі цієї концепції лежить розуміння земельної ділянки як динамічного об'єкта, стан якого постійно змінюється під впливом природних факторів та людської діяльності. На відміну від класичних методів, де інформація збирається вибірково і вручну, методологія ГІС передбачає створення суцільного цифрового образу території, де кожен квадратний метр має свої координати та набір характеристик.

ВІТЗ

Ключовим науковим підходом тут є аналіз спектральної відбивної здатності рослинного покриву. Це базується на фізичному принципі, згідно з яким здорові рослини та ґрунт по-різному взаємодіють із сонячним світлом у видимому та інфрачервоному діапазонах. Вимірюючи ці відмінності за допомогою супутників, науковці отримують можливість дистанційно оцінювати рівень фотосинтетичної активності, вміст хлорофілу та вологи в посівах. Такий підхід перетворює візуальне спостереження на точне математичне моделювання, де стан вегетації виражається через цифрові індекси.

Методологія також включає часовий аналіз, який дозволяє порівнювати дані за різні роки або фази вегетації. Це дає змогу виявити не просто разовий стан поля, а стійкі тенденції — наприклад, поступову деградацію ґрунту, посилення ерозійних процесів або ефективність впроваджених агротехнічних заходів. Завдяки накладанню різних інформаційних шарів, таких як рельєф, тип ґрунту та історія посівів, ГІС-технології дозволяють встановити причини погіршення стану рослинності та обґрунтувати необхідність зміни способу використання конкретної ділянки.

У підсумку, наукова основа такого моніторингу полягає у переході від описового управління землями до прогностичного. Це означає, що за допомогою накопичених даних можна не лише фіксувати проблеми, а й моделювати сценарії оптимального використання угідь, які забезпечать збереження родючості ґрунтів при максимальній економічній ефективності. Таким чином, ГІС-моніторинг виступає як інтелектуальна надбудова над традиційним землеустроєм, що забезпечує об’єктивність та наукову обґрунтованість управлінських рішень.

ВЦЗ

1 Теоретико-методологічні основи ГІС-моніторингу сільськогосподарських угідь

1.1 Поняття та складові моніторингу земель сільськогосподарського призначення

Сучасне розуміння моніторингу земель сільськогосподарського призначення виходить далеко за межі простого збору статистичних даних про площі посівів. Це комплексна загальнодержавна та виробнича система, що базується на принципах безперервності, цілісності та оперативності спостережень. У науковій літературі та законодавстві моніторинг трактується як система регулярних спостережень за станом земельного фонду з метою своєчасного виявлення змін, їх оцінки, відвернути та ліквідації наслідків негативних процесів. Для сільськогосподарських угідь це поняття набуває особливої гостроти, оскільки рілля, сіножаті та пасовища є найбільш вразливими до антропогенного навантаження. Моніторинг тут виступає як інструмент діагностики «здоров'я» грунту та рослинності, що дозволяє підтримувати екологічну рівновагу агроландшафтів у довгостроковій перспективі.

Фундаментальне поняття моніторингу включає три основні рівні: глобальний, регіональний та локальний. У контексті сільськогосподарського використання земель найбільше значення має локальний рівень, який дозволяє детально аналізувати конкретні масиви та навіть окремі ділянки поля. Це дає змогу сформувати повне уявлення про динаміку родючості, рівень забруднення та інтенсивність деградаційних процесів. Методологія такого спостереження базується на поєднанні традиційних методів (експедиційних обстежень, лабораторних аналізів) із новітніми технологіями автоматизованої обробки просторових даних. Це дозволяє перетворити моніторинг із пасивного процесу фіксації фактів на активний механізм управління, де кожна зміна показника стає сигналом до конкретної агротехнічної дії.

Розглядаючи складові моніторингу, перш за все необхідно виділити суб'єктно-об'єктний склад системи. Об'єктом виступає весь земельний фонд

сільськогосподарського призначення, включаючи не лише активну ріллю, а й землі, що знаходяться під паром, меліоровані території та прилеглі захисні лісосмуги. Суб'єктами ж є державні органи, землевпорядні організації та самі землекористувачі, які зацікавлені у збереженні ресурсної бази. Проте головна структура моніторингу розкривається через його функціональні блоки: інформаційний, аналітичний, прогнозний та управлінський.

Інформаційна складова є фундаментом всієї системи. Вона забезпечує постійний приплив первинних даних, які поділяються на статичні та динамічні. До статичних належать дані про межі ділянок, їх правовий статус та базові характеристики рельєфу. Динамічні дані — це ті, що постійно змінюються: вологість ґрунту, вміст азоту, фосфору та калію, температура поверхні та стан вегетації рослин. У сучасних умовах інформаційний блок неможливий без залучення даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Супутникові знімки високої розрізненості дозволяють отримувати інформацію про стан угідь без виїзду спеціалістів на місце, що значно здешевлює процес і підвищує об'єктивність. Ця складова також включає аерофотозйомку з використанням безпілотних літальних апаратів, що забезпечує надвисоку детальність аналізу окремих рослин чи проблемних зон поля.

Аналітична складова моніторингу відповідає за перетворення сирих даних у змістовну інформацію. Це «мозок» системи, де відбувається порівняння поточних показників із нормативними значеннями та фоновими показниками конкретної природно-сільськогосподарської зони. У цьому блоці здійснюється інтерпретація спектральних характеристик рослинності, розраховуються вегетаційні індекси та виявляються аномалії. Наприклад, якщо на певній ділянці індекс NDVI (нормалізований різницевий вегетаційний індекс) значно нижчий за середній по полю, аналітична система допомагає встановити причину: це може бути нестача вологи, поширення шкідників, нерівномірне внесення добрив або початкова стадія ерозії ґрунту. Саме аналіз дозволяє перейти від простого опису картини до розуміння внутрішніх процесів, що відбуваються в агрофітоценозі.

Прогнозна складова є однією з найскладніших, оскільки вона вимагає використання математичних моделей та ретроспективного аналізу даних за багато

років. Її суть полягає у випереджальному відображенні ймовірного стану угідь через певний проміжок часу. Моделювання дозволяє передбачити розвиток деградаційних процесів, таких як засолення чи підтоплення, та оцінити ризики втрати врожаю під впливом засухи чи інших кліматичних аномалій. Прогнозний блок дає змогу розробити кілька сценаріїв розвитку подій залежно від обраної стратегії землекористування, що є незамінним для стратегічного планування розвитку агропідприємства чи цілого регіону.

Управлінська складова є логічним завершенням циклу моніторингу. Вона переводить результати досліджень у площину практичних рекомендацій та управлінських рішень. Це можуть бути пропозиції щодо рекультивації земель, зміни структури сівозмін, впровадження систем точного землеробства або вилучення малопродуктивних земель з інтенсивного обробітку. Цей блок забезпечує зворотний зв'язок: після впровадження рекомендацій моніторинг фіксує реакцію екосистеми на ці заходи, що дозволяє коригувати дії в реальному часі. Без цієї складової моніторинг залишався б суто теоретичним архівом даних, не приносячи реальної економічної чи екологічної користі.

Окрему увагу в структурі моніторингу слід приділити нормативно-методичному забезпеченню. Воно визначає правила гри: періодичність збору даних, формати їх зберігання та методи обробки. В Україні цей процес регламентується державними стандартами та нормами землеустрою, що гарантує порівнянність даних, отриманих різними організаціями в різний час. Використання єдиних систем координат та уніфікованих методик розрахунку агрохімічних показників дозволяє формувати єдину державну систему моніторингу, яка є основою для ведення Державного земельного кадастру.

Таким чином, моніторинг сільськогосподарських угідь сьогодні — це високотехнологічна екосистема, де фізичні властивості землі трансформуються у цифрові потоки інформації. Його складові працюють як єдиний організм, де кожна частина підсилює іншу: дані ДЗЗ дають масштабність, наземні обстеження — точність, а ГІС-технології — можливість бачити приховані закономірності. Розуміння цих складових є ключовим для побудови сучасної моделі землекористування, яка б поєднувала в собі високу прибутковість сільського

господарства зі збереженням природної родючості та екологічної цілісності українських чорноземів. Лише такий комплексний підхід дозволяє перетворити землю з простого засобу виробництва на капітал, що здатний до самовідтворення та сталого розвитку в умовах глобальних змін.

1.2 Роль ГІС-технологій та дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у сучасному землеустрої

Сучасний етап розвитку землеустрою характеризується переходом від традиційних паперових технологій до комплексного цифрового моделювання територій. У цьому контексті геоінформаційні системи (ГІС) та дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) виступають не просто як допоміжні інструменти, а як фундаментальна технологічна основа, що докорінно змінює методологію проектування, моніторингу та охорони земель. Роль ГІС полягає у здатності інтегрувати величезні масиви різнорідних даних — від правових меж земельних ділянок до фізичних показників ґрунту — у єдиному цифровому просторі, що дозволяє фахівцям бачити повну картину стану земельних ресурсів у режимі реального часу.

Дистанційне зондування Землі, своєю чергою, забезпечує землеустрій безпрецедентною за обсягом та об’єктивністю інформацією. Використання космічних апаратів, таких як Sentinel або Landsat, дозволяє фахівцям отримувати дані про стан вегетації, рівень зволоженості та термічні характеристики земної поверхні без необхідності дороговартісних виїздів на місце. Поєднання ГІС та ДЗЗ створює синергетичний ефект: супутникові знімки постачають актуальну «сиру» інформацію, а ГІС-платформи забезпечують її обробку, просторову прив’язку та візуалізацію у формі тематичних карт, що є основою для будь-якого проекту землеустрою.

Однією з ключових функцій ГІС у сучасному землеустрої є ведення та наповнення кадастрових систем. Цифрові кадастрові карти дозволяють уникати накладання меж ділянок, оперативно вносити зміни у цільове призначення земель

та контролювати дотримання охоронних зон. Завдяки автоматизації розрахунків, ГІС-технології значно прискорюють процеси інвентаризації земель та оцінки їхньої вартості. У таблиці нижче наведено порівняння традиційних підходів та сучасних методів із використанням ГІС і ДЗЗ.

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика методів землеустрою

Параметр порівняння	**Традиційний землеустрій**	**Землеустрій на основі ГІС та ДЗЗ**
Джерело даних	Наземні вимірювання, архівні карти	Супутникові знімки, БПЛА, GPS-дані
Оперативність	Низька (потрібні виїзди та заміри)	Висока (оновлення даних у реальному часі)
Точність аналізу	Суб'єктивна, залежить від людського фактора	Об'єктивна, на основі спектральних даних
Візуалізація	Статичні паперові плани та карти	Динамічні 3D-моделі, інтерактивні карти
Прогнозування	Обмежене (описове)	Математичне моделювання сценаріїв

Важливу роль ГІС-технології відіграють у проектуванні сівозмін та оптимізації структури сільськогосподарських угідь. Використовуючи методи просторового аналізу, можна накласти карту крутизни схилів на карту типів ґрунтів і отримати схему найбільш ерозійно небезпечних ділянок. Це дозволяє землевпоряднику обґрунтовано запропонувати вилучення таких земель із оранки та їх подальше залуження або заліснення. Таким чином, ГІС перетворює

ВПЗ

землеустрій із суто технічної процедури на інструмент екологічного планування, що забезпечує сталий розвиток територій.

Особливе значення ДЗЗ у землеустрої полягає у можливості здійснення ретроспективного аналізу. Маючи доступ до архівних супутникових знімків за останні 20–30 років, фахівці можуть відстежити, як змінювався стан конкретного масиву земель: чи відбувалося розширення ярів, чи не зменшувалася площа лісосмуг, як змінювалася межа підтоплення територій. Ця інформація є критично важливою для розробки схем землеустрою та техніко-економічних обґрунтувань використання земель на рівні громад чи регіонів.

Технологічний ланцюжок використання ГІС та ДЗЗ у землеустрої зазвичай виглядає наступним чином:

1. Отримання первинних даних: завантаження супутникових знімків у різних спектральних діапазонах.
2. Попередня обробка: атмосферна та геометрична корекція знімків для усунення спотворень.
3. Тематична обробка: розрахунок індексів (NDVI, NDWI) для оцінки біологічного стану угідь.
4. Синтез даних: накладання результатів аналізу на існуючі кадастрові межі в середовищі ГІС.
5. Розробка проектних рішень: створення нових електронних карт землеустрою з урахуванням виявлених факторів.

Крім того, впровадження ГІС-технологій сприяє підвищенню прозорості земельних відносин. Публічні кадастрові карти та геопортали громад, створені на базі ГІС, дозволяють власникам та орендарям земель отримувати актуальну інформацію про обмеження у використанні ділянок, наявність інженерних комунікацій чи приналежність до природно-заповідного фонду. Це мінімізує корупційні ризики та сприяє інвестиційній привабливості аграрного сектору.

На завершення слід зазначити, що роль ГІС та ДЗЗ у сучасному землеустрої полягає у формуванні нової парадигми управління земельними ресурсами — «розумного землеустрою». Це підхід, де кожне рішення про використання землі базується не на припущеннях, а на точних цифрових даних. В умовах глобальних

ВІТЗ

кліматичних змін та необхідності забезпечення продовольчої безпеки, інтеграція ГІС-технологій у землеустрій стає безальтернативним шляхом до раціонального та бережливого ставлення до головного багатства країни — її земельних ресурсів.

1.3 Огляд нормативно-правової бази та державних стандартів моніторингу земель в Україні

Нормативно-правове регулювання моніторингу земель в Україні є складним багаторівневим механізмом, який визначає правові, організаційні та економічні засади спостереження за станом земельного фонду. Фундаментом цієї бази є Конституція України та Земельний кодекс України, який у статті 191 безпосередньо визначає моніторинг земель як систему спостереження за станом земель з метою своєчасного виявлення змін, їх оцінки, відвернути та ліквідації наслідків негативних процесів. Відповідно до кодексу, об’єктом моніторингу є всі землі в межах території України, незалежно від форми власності, що підкреслює державну значущість контролю за збереженням ресурсного потенціалу країни.

Ключовим документом, що деталізує процедурні аспекти, є Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Положення про моніторинг земель». Це положення встановлює порядок ведення моніторингу, визначає коло суб’єктів, відповідальних за збір та обробку даних, а також регламентує структуру інформаційної бази. Згідно з постановою, ведення моніторингу покладається на Державну службу України з питань геодезії, картографії та кадастру (Держгеокадастр) разом із Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів і Міністерством аграрної політики та продовольства. Така міжвідомча взаємодія передбачає обмін даними між різними кадастрами та інформаційними системами, що є особливо важливим для сільськогосподарських угідь, де стан ґрунту нерозривно пов’язаний з екологічними показниками.

Важливою складовою законодавчої бази є Закон України «Про охорону земель», який розглядає моніторинг як один із головних заходів забезпечення раціонального використання земельних ресурсів. Закон визначає обов’язки

ВІТЗ

землевласників та землекористувачів щодо сприяння проведенню моніторингових досліджень та впровадження заходів із запобігання деградації ґрунтів. Крім того, Закон України «Про землеустрій» регламентує використання результатів моніторингу при розробці проектів землеустрою, забезпечуючи правовий зв’язок між виявленими змінами стану угідь та подальшим плануванням їх використання.

Методологічна точність моніторингу забезпечується системою державних стандартів (ДСТУ). Зокрема, значна частина стандартів стосується методів визначення якості ґрунтів та вегетації. Важливе місце посідає ДСТУ 8302:2015, який встановлює правила оформлення бібліографічних посилань у наукових роботах, що є критичним для звітності та наукового супроводу моніторингу. Окрім цього, існують спеціалізовані стандарти щодо методів відбору проб ґрунту, проведення агрохімічних обстежень та використання супутникових даних у картографуванні.

Сучасний розвиток нормативної бази спрямований на інтеграцію українського законодавства до вимог Європейського Союзу, зокрема в межах Директиви INSPIRE, яка стосується створення інфраструктури просторових даних. Це передбачає перехід до відкритих стандартів обміну геоінформацією, що дозволяє використовувати дані моніторингу в міжнародних проектах та залучати іноземні інвестиції в аграрний сектор. Також значна увага приділяється нормам щодо захисту інформації в інформаційно-комунікаційних системах, що є критично важливим для збереження державних баз даних у цифровому вигляді.

Таблиця 1.2 - Ієрархічна структура нормативного забезпечення моніторингу земель

Рівень регулювання	**Основні документи**	**Функція у системі моніторингу**
Законодавчий	Земельний кодекс України, Закони «Про охорону земель», «Про землеустрій»	Визначення правового статусу, обов'язків суб'єктів та об'єктів моніторингу
Нормативний	Постанови КМУ «Про моніторинг	Встановлення процедур збору,

ВПЗ

Рівень регулювання	Основні документи	Функція у системі моніторингу
	земель», «Про Державний земельний кадастр»	обробки та зберігання геопросторових даних
Технічний (Стандарти)	ДСТУ серії «Якість ґрунту», галузеві нормативи ДЗЗ та ГІС	Регламентація методів вимірювання, точності даних та форматів обміну
Відомчий	Накази Держгеокадастру, Міндовкілля	Оперативне управління, затвердження форм звітності та методик аналізу

Окремим аспектом є правове регулювання використання даних дистанційного зондування. Хоча космічний моніторинг де-факто є основним джерелом оперативної інформації, нормативна база щодо юридичного статусу супутникових знімків як доказової бази при виявленні порушень (наприклад, самовільного захоплення земель або нецільового використання) продовжує вдосконалюватися. Це вимагає розробки нових державних стандартів, які б регламентували похибки та методику верифікації дистанційних даних через наземні спостереження.

Таким чином, нормативно-правова база моніторингу земель в Україні забезпечує необхідні юридичні умови для функціонування системи контролю за земельними ресурсами. Проте вона потребує постійної адаптації до стрімкого розвитку технологій ГІС та ДЗЗ. Створення цілісного правового поля, де технічні стандарти гармонійно поєднуються із законодавчими вимогами, є запорукою ефективного державного управління земельним фондом та основою для оптимізації сучасного землекористування.

1.4 Світовий досвід використання ГІС для оптимізації використання земельних ресурсів

ВІП

Аналіз глобального досвіду свідчить, що впровадження геоінформаційних систем у сферу управління земельними ресурсами є ключовим фактором сталого розвитку агропромислового комплексу. У розвинених країнах, таких як США, Канада, держави Європейського Союзу та Австралія, ГІС-технології інтегровані в єдині національні інфраструктури просторових даних, що дозволяє поєднувати екологічний моніторинг із економічним плануванням на всіх рівнях — від окремої ферми до цілої країни.

Досвід Сполучених Штатів Америки (США) базується на масштабному використанні даних програми Landsat та розгалуженої мережі наземних сенсорів. Платформи, подібні до USDA CropScape, надають відкритий доступ до інтерактивних карт посівів, що дозволяє фермерам та державним органам аналізувати історію землекористування за десятиліття. Основний акцент тут робиться на точному землеробстві (Precision Agriculture). Використання ГІС дозволяє створювати карти диференційованого внесення добрив, що в масштабах країни призводить до значної економії ресурсів та мінімізації хімічного навантаження на ґрунти.

У Європейському Союзі (ЄС) розвиток ГІС-моніторингу тісно пов’язаний із реалізацією Спільної сільськогосподарської політики (CAP) та програми Copernicus. Використання супутників Sentinel-1 та Sentinel-2 забезпечує безкоштовний і оперативний моніторинг сільськогосподарських угідь по всій Європі. Особливістю європейського підходу є система LPIS (Land Parcel Identification System) — геоінформаційна база даних, яка ідентифікує кожну земельну ділянку. Це дозволяє не лише контролювати цільове використання земель, а й автоматично розраховувати субсидії для фермерів на основі екологічних показників стану їхніх угідь, таких як збереження біорізноманіття та запобігання ерозії.

Досвід Австралії та Ізраїлю є показовим у контексті управління земельними ресурсами в умовах дефіциту вологи. Тут ГІС-технології інтегровані з автоматизованими системами поливу. Супутниковий моніторинг індексів вологості (NDWI) дозволяє в режимі реального часу коригувати норми зрошення, що забезпечує максимальну врожайність при мінімальних витратах води. Такі

ВІГЗ

системи дозволяють перетворювати малопридатні землі на високоефективні агроландшафти.

Таблиця 1.3 - Порівняння підходів до використання ГІС у світі

Країна/Регіон	**Ключовий акцент використання**	**Основні інструменти**
США	Максимізація прибутку та точне землеробство	GPS-навігація, сенсори ґрунту, Landsat
ЄС	Екологічний контроль та адміністрування субсидій	Програма Copernicus, система LPIS
Австралія	Управління водними ресурсами та боротьба з ерозією	Моделі прогнозування посух, ГІС-зрошення
Бразилія	Моніторинг розширення ріллі та охорона лісів	Радарне зондування (SAR), ГІС-картографування

Світова практика також демонструє активний розвиток хмарних ГІС-платформ (наприклад, Google Earth Engine), які дозволяють обробляти гігабайти супутникових даних без потужних локальних серверів. Це зробило професійний моніторинг доступним навіть для невеликих господарств. Крім того, трендом останніх років є використання штучного інтелекту та машинного навчання для автоматичного розпізнавання культур та прогнозування врожайності на основі багаторічних архівів ГІС-даних.

Важливим уроком світового досвіду для України є необхідність створення відкритого доступу до геоданих. Країни, що забезпечили прозорість земельної інформації, продемонстрували стрімке зростання інвестицій в агротехнології. ГІС у світовій практиці виступає не просто картою, а цифровим двійником території, який дозволяє проводити експерименти та моделювати наслідки будь-яких управлінських рішень ще до їхнього впровадження в реальність.

Таким чином, світовий досвід підтверджує, що оптимізація землекористування неможлива без глибокої інтеграції ГІС та ДЗЗ. Україна, маючи

ВІЗ

значний аграрний потенціал, повинна орієнтуватися на європейську модель інтегрованого моніторингу та американську модель точного землеробства, створюючи власну національну систему, яка б враховувала специфіку вітчизняних чорноземів та сучасні виклики цифровізації.

ВШЗ

2. Методи цифрової обробки космічних знімків

2.1 Основні відомості про дистанційне зондування Землі

ДЗЗ (англ. **remote sensing)** з космосу – це отримування даних про Зем-лю з космосу, використовуючи властивості електромагнітних хвиль, випро-мінюваних, відбиваних, поглинених чи розсіюваних об'єктами зондування [20].

Кінцевою метою ДЗЗ є розпізнавання об'єктів, явищ, процесів, що попа-дають в поле зору, визначення їх положення в просторовій системі координат шляхом перетворення отриманих даних на картографічній основі.

Для функціонування системи ДЗЗ необхідна узгоджена робота 4-х скла-дових ланок (рис. 2.1):

- ✓ носіїв знімальної апаратури (аеро та космічних);
- ✓ знімальної та реєструючої апаратури;
- ✓ бортових засобів передачі даних на Землю;
- ✓ наземних комплексів прийому інформації ДЗЗ її обробки та на-дання споживачам.

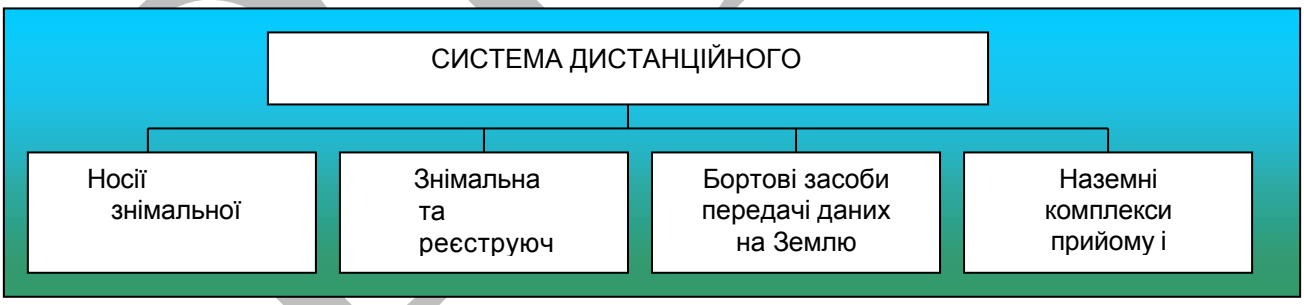


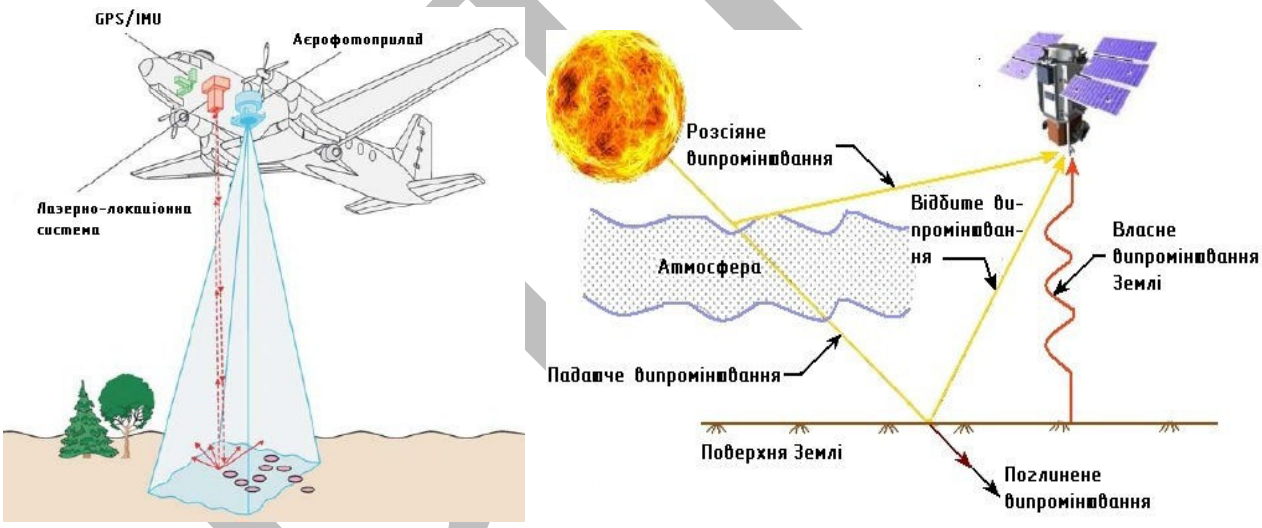
Рисунок 2.1. Структура системи дистанційного зондування Землі

Оскільки ДЗЗ є непрямим методом отримання інформації про те, що ро-зташовано на земній поверхні, її надрах, або в атмосфері, то для отримання змістовної інформації із зібраних ДДЗ, потрібні спеціальні методи обробки цих даних.

Інформацію про розташовані на земній поверхні об'єкти та їх власти-вості можна отримати, вимірюючи параметри власного випромінювання Зе-

млі і відбитого електромагнітного випромінювання Сонця, котрі залежать від фізичних, хімічних і біологічних властивостей досліджуваних об'єктів. Електромагнітне випромінювання різних спектральних діапазонів містить взаємодоповнюючу інформацію про об'єкти і явища на земній поверхні. Одночасна реєстрація випромінювання в декількох спектральних зонах (багатозональний принцип) дозволяє отримати найбільш всебічну характеристику місцевості.

ДЗЗ ґрунтується на двох групах знімків: отримуваних з літаків (геліко-птерів, безпілотних літальних апаратів, дельтапланів тощо) – повітряних (аерознімків) (рис. 2.2, *а*) та з супутників – космічних (орбітальних) (рис. 2.2, *б*). Хоча принципових відмінностей між ними немає, КЗ більше відповідають розмірності географічних об'єктів і поширеним масштабам географічних досліджень.



а *б*

Рисунок 2.2. Способи отримання даних за допомогою:
а – аерофотознімання; *б* – супутників

Уявлення про різкі відмінності космічних і аерознімань зародилося то-ді, коли з'явилися перші доступні знімки з космосу. Вони були дрібномасш-табними, захоплювали одним кадром цілі регіони (що дійсно неможливо бу-ло виконати за допомогою аерознімання), часто були багатозональними (що на той момент було мало звичним, хоча і принципово можливим, для аероз-

німання), нарешті, саме через космічні знімки систем LANDSAT TM і LANDSAT MSS широкі кола фахівців уперше познайомилися з цифровими (сканерними) знімками.

Дійсно, такі космічні дрібномасштабні зйомки унікальні, оскільки до-зволяють охопити поглядом цілий регіон і виявити такі узагальнені (генера-лізовані) особливості, котрі при спробі їх відтворення за дрібними фрагмен-тами просто вислизають від вивчення.

Методи ДЗЗ з космосу характеризуються наступними перевагами:

- високою оглядовістю, можливістю отримання одночасної інформації про великі території;
- можливістю переходу від дискретної картини значень показників стану навколишнього середовища в окремих пунктах території до безперервної картини просторового розподілу показників;
- можливістю отримання інформації про важкодоступні райони;
- високим рівнем генералізації інформації.

Ці переваги найбільш відчутні у сфері глобального моніторингу, де оглядовість матеріалів і генералізація інформації грають істотну роль, а та-кож у сфері національного моніторингу держав, що займають великі терито-рії. Однак і в сфері регіонального моніторингу, при вирішенні конкретних задач, методи ДЗЗ можуть успішно доповнювати контактні методи вимірів, а в деяких випадках навіть перевершувати їх за інформативністю.

На рис. 2.3 показано криву прозорості атмосфери в діапазоні довжин хвиль від 0 до 22 мкм, звідки видно, що *майже половина спектрального діа-пазону виявляється абсолютно непридатною з точки зору дистанційного зондування земної поверхні, оскільки відповідне випромінювання не може пройти через атмосферу*.

Для дистанційного зондування використовують тільки ті діапазони до-вжин хвиль, які лежать поза основними інтервалами поглинання, тобто у так званих «вікнах прозорості атмосфери» (рис.2.4), де коефіцієнт пропускання електромагнітних хвили достатньо високий.

ВГЗ

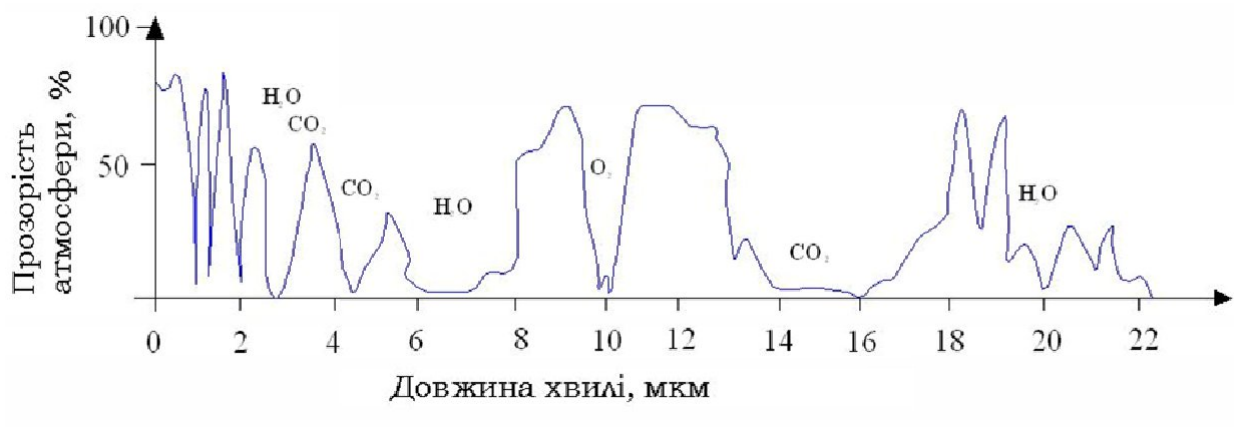


Рисунок 2.3. Вікна прозорості атмосфери

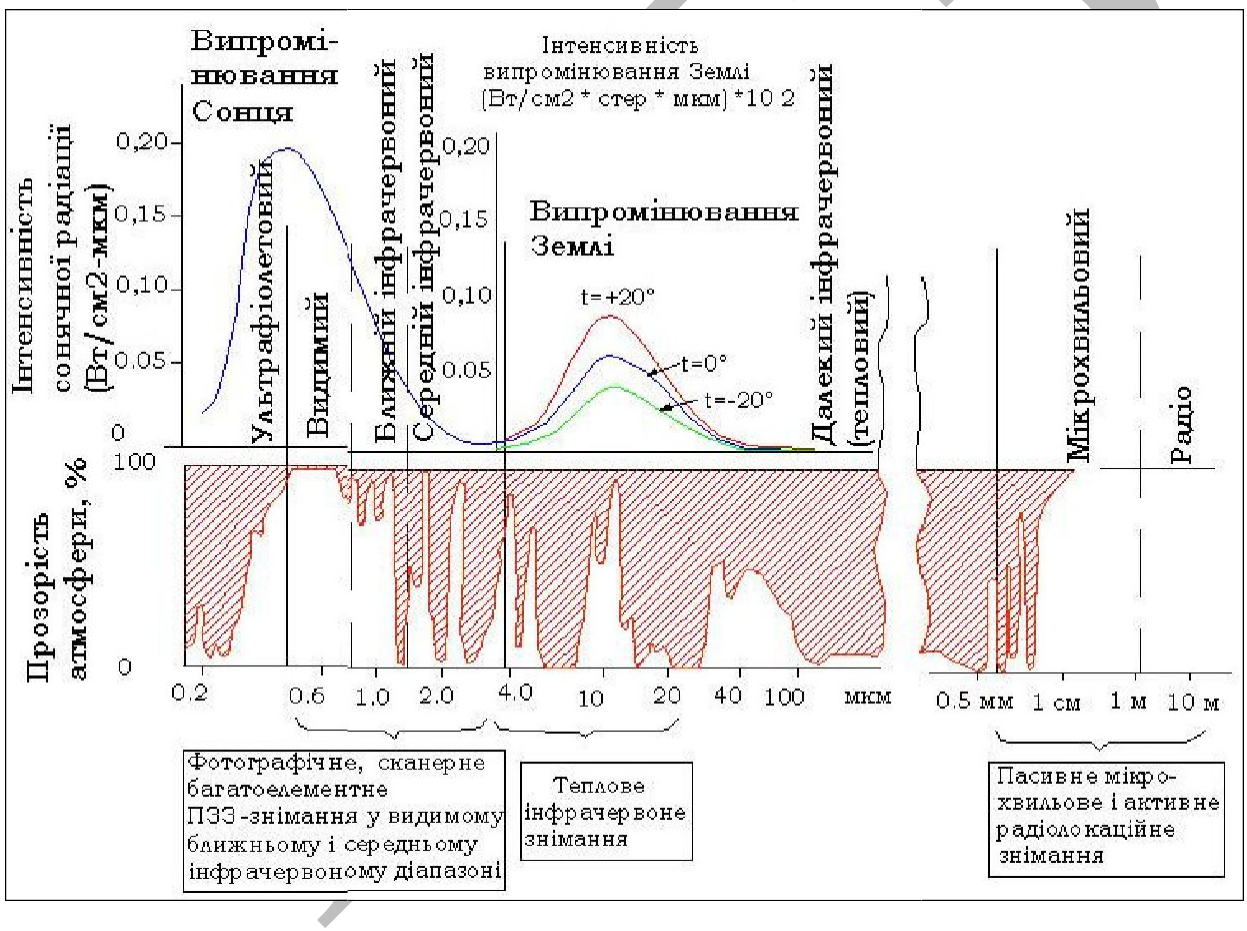


Рисунок 2.4. Випромінювання Сонця і Землі, «вікна прозорості атмосфери» і основні знімальні діапазони

2.2 Отримання космічних знімків та їх основні характеристики

ДЗЗ з космосу надає унікальну можливість отримувати цінну інформа-цію про земні об’єкти та явища в глобальному масштабі з високим просторо-вим і часовим розрізненням. Космічна зйомка поверхні Землі визначає фізи-чні, хімічні, біологічні, геометричні параметри об’єктів спостереження в різ-них середовищах Землі, зазвичай, використовуючи функціональну залеж-ність між інструментальними можливостями космічної техніки та досліджу-ваними параметрами. Спектральний діапазон бортових вимірювачів вибира-ють при їх розробці в залежності від випромінюваної здатності об’єктів спо-стереження. Діаграма спектральних характеристик потенційних об’єктів спостере-ження на Землі та деяких приладів, встановлених на космічних апаратах ДЗЗ, представлений на рис. 2.5.

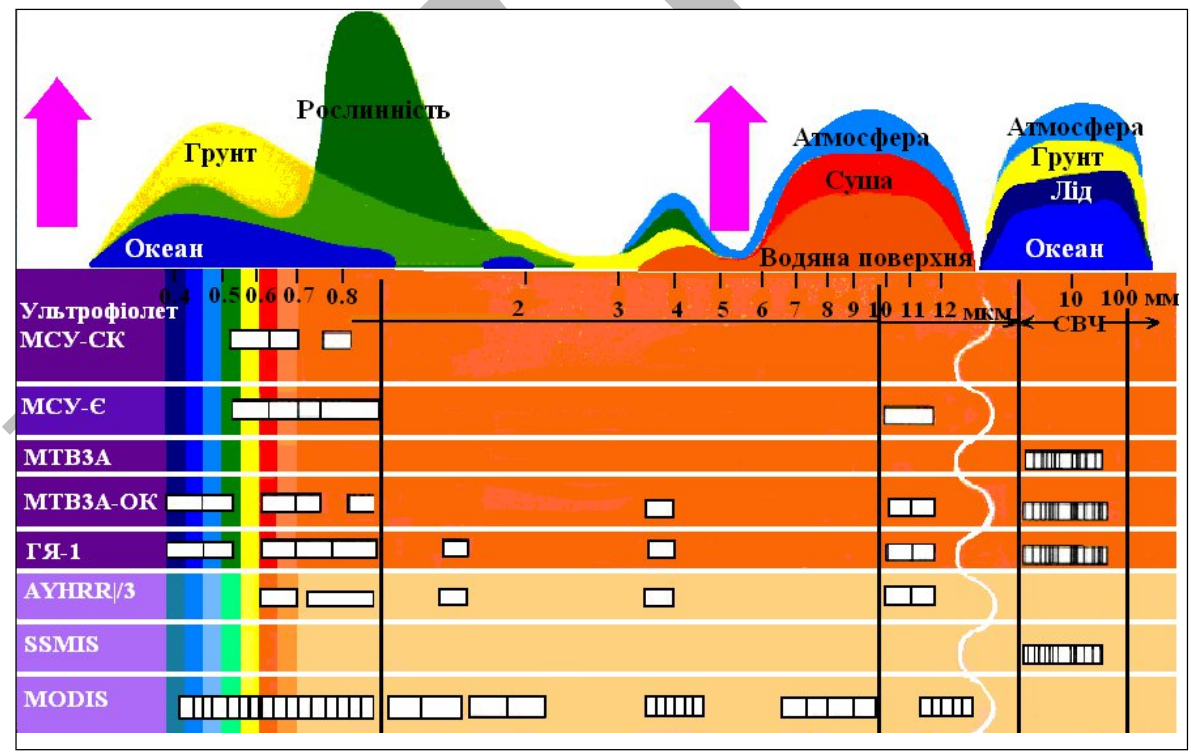


Рисунок 2.5. Діаграма спектральних характеристик потенційних об’єктів спосте-реження на Землі та окремих приладів, встановлених на космічних апаратах ДЗЗ

Процес космічної зйомки у видимому діапазоні спектра електромагніт-ного випромінювання можна представити схемою (рис.2.6): висвітлення со-нячним світлом земної поверхні - відбиття об’єктами світлового потоку - проходження відбитого світла через атмосферу - формування зображення си-стемою «ілюмінатор - об’єктив» - фіксації прихованого зображення світлочу-тливим шаром - візуалізація прихованого зображення на борту супутника або в наземних умовах.

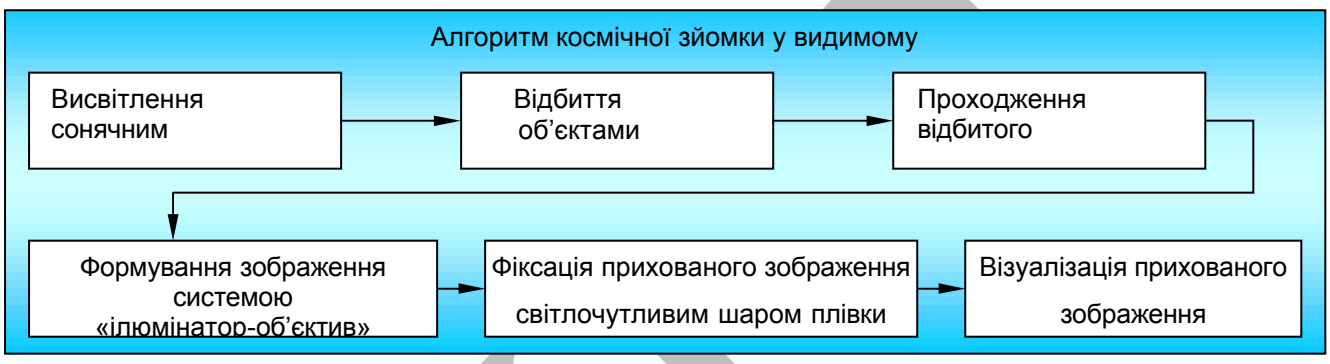


Рисунок 2.6. Алгоритм космічної зйомки у видимому діапазоні

Традиційно дані космічного зондування називають, але традиційний фотознімок – це представлення об’єкта або сцени на плівці, яку отримують за отримують за допомогою фотокамер. При сучасному космічному дистанційному зондуванні використовують цифрові камери та сканерні системи, що працюють в дуже вузькому діапазоні електромагнітного спектру і реєструють інформацію про певні властивості об’єкта у цифровому вигляді.

Знімок – це двовимірне зображення, отримане в результаті дистанцій-ної реєстрації технічними засобами власного або відбитого випромінювання і призначене для виявлення, якісного і кількісного вивчення об’єктів, явищ і процесів шляхом дешифрування, виміру і картографування.

Космічний знімок (космознімок) – це знімок об’єкта зондування, отриманий з космосу за допомогою технічних засобів ДЗЗ.

До основних характеристик КЗ належать:

просторова розрізненність (на місцевості) (spatial resolution) – характеристика зображення, створювана видовим технічним засобом ДЗЗ, яку ви-

значає розмір найменшого компактного об’єкта або ширина видовженого об’єкта певного контрасту, якого можна визначити (розрізнити) на цьому зображенні з заданою імовірністю;

радіометрична розрізненність (radiometric resolution) – найменша різ-ниця інтенсивностей сигналів, що надходять від об’єкта зондування, яку мо-же визначити (розрізнити) технічний засіб ДЗЗ;

спектральна розрізненність (spectral resolution) – найменша різниця частот сигналів електромагнітного випромінювання, що надходить від об’єкта зондування, яку може визначити (розрізнити) технічний засіб ДЗЗ;

часова розрізненність (temporal resolution) – Найменший інтервал ча-су, через який можливе повторне знімання сцени [20].

Дистанційне зондування з космосу виконують з висоти понад 100 км, тобто при русі носія апаратури поза атмосферою, у космічному просторі, з ракет, пілотованих космічних кораблів і орбітальних станцій, автоматичних штучних супутників Землі та інших космічних апаратів.

КЗ широко використовують у самих різних областях людської діяльно-сті: дослідженні природних ресурсів, моніторингу стихійних лих та оцінці їх наслідків, вивченні впливу антропогенного впливу на навколишнє середови-ще, будівельних та проектно-дослідницьких роботах, міському і земельному кадастрах, плануванні і управлінні розвитком територій, містобудуванні, гео-логії і освоєнні надр, промисловості, сільському і лісовому господарстві, ту-ризмі і т. ін. Сучасні геоінформаційні технології та створення карт різних ма-сштабів також немислимі без використання КЗ.

КЗ мають велику пізнавальну цінність, підсилену, порівняно з аерозні-мками, їх особливими властивостями, такими як велика оглядовість, генера-лізація зображення, комплексне відображення усіх компонентів геосфери, ре-гулярна повторюваність через певні інтервали часу, оперативність надхо-

ВІТЗ

дження інформації, можливість її отримання для об'єктів, недоступних вивченню іншими засобами.

У порівнянні з аерознімками, КЗ охоплюють значно більшу площу, тобто володіють більшою оглядовістю. При використанні однієї й тієї ж сис-теми фотографування для аерофотознімання з висоти 5 км і космічної зйомки з висоти 250 км охоплення при зйомці з космосу збільшується у 50 разів по стороні знімка й у 2500 разів по площі. Таким чином, один космічний знімок, перекриває таку площу, яка дорівнює 10 000 аерознімків. При цьому великі регіони охоплюються зйомкою одноразово, при одних і тих же самих умовах (стан об’єктів зйомки, їхня освітленість). З’являється можливість досліджен-ня регіональних і зональних закономірностей, глобальних явищ, вести дослідження в планетарному масштабі.

Треба відзначити, що основний об’єм використовуваних на сьогодні КЗ і тим більш у майбутньому – це знімки з ШСЗ, а не з пілотованих апаратів.

Залежно від технічних характеристик апаратури ДЗЗ, особливо її розрізненності, знімки з космічних апаратів мають різне функціональне використання. За детальністю знімки поділяються на:

1) знімки надвисокої розрізненності (до 1 м);
2) знімки високої розрізненності (до 10 м);
3) знімки середньої розрізненності (до 100 м);
4) знімки низької розрізненності (до 1 км і більше).

Знімки низької розрізненності, зазвичай, використовуються на великі території, для таких цілей як, наприклад, оцінювання стану рослинного покриву, аналіз і прогноз погоди та стихійних лих тощо. Знімки високої і надвисокої розрізненності придатні для топографічного картографування, різного роду моніторингів природних об’єктів, для створення баз топографічних даних. Найвищі вимоги до точності і детальності збору даних ДЗЗ ставляться при їх використанні для топографічного картографування та містобудівного кадастру. Використання КЗ надвисокої розрізненності підходить для аналізу міської забудови, проведення інженерних вишукувань, створення топографі-

ВІЗ

чних карт, для уточнення даних ДЗЗ нижчої розрізненності. Інтеграція даних високої та надвисокої розрізненності з даними нижчої розрізненності дозволяє отримувати синтезовані зображення у натуральних кольорах високого рівня детальності. За даними космічного знімання з розрізненності до 10 м бу-дуються цифрові моделі рельєфу, цифрові моделі поверхні та створюються об'єктні карти. Зображення такого типу також використовуються для вивчення ландшафтного середовища, у телекомунікаціях, для управління зем-лекористуванням і моніторингом земель, для туризму та особливо для топографічних цілей.

На сьогоднішній день на орбіту Землі запущено ряд комерційних супу-тників, що дають знімки надвисокої роздільної здатності. Найбільш відомі з них представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1- Супутники високої і надвисокої розрізненності

Назва	Дата запуску	Країна	Розрізненність, м	
			Панхроматичний канал	Мультиспектральний канал
Cartosat-2	10.01.2007	Індія	0,8	не має
Cartosat-2B	12.07.2010	Індія	0,8	не має
Deimos-2	19.06.2014	Іспанія	0,75 (1)	4
GeoEye-1	06.09.2008	США	0,41 (0,5)	1,65 (2)
IKONOS	24.09.1999	США	0,82	3,28
Kompsat-3	17.05.2012	Південна Корея	0,7	2,8
Pleiades-1A	16.12.2011	Франція	0,7 (0,5)	2,8 (2)
Pleiades-1B	02.12.2012	Франція	0,7 (0,5)	2,8 (2)
QuickBird	18.10.2001	США	0,61	2,44
SPOT-6	09.09.2012	Франція	1,5	6
SPOT-7	09.09.2012	Франція	1,5	6
WorldView-1	18.09.2007	США	0,46 (0,5)	не має
WorldView-2	08.10.2009	США	0,46 (0,5)	1,84 (2)
WorldView-3	13.08.2014	США	0,31	1,24
Ресурс-ДК1	15.06.2006	Росія	1	3

ВНТУ

Співвідношення між розмірами об’єктів, що вивчаються в різних облас-тях географічних досліджень, і розрізненням знімків, яке забезпечується основними знімальними системами, представлено на рис. 2.7. З рис. 2.7 видно, які задачі можна вирішувати за знімками різних типів і в якій мірі забезпечуються потреби різних областей географічних досліджень і тематичного картографування сучасними знімальними матеріалами [39].

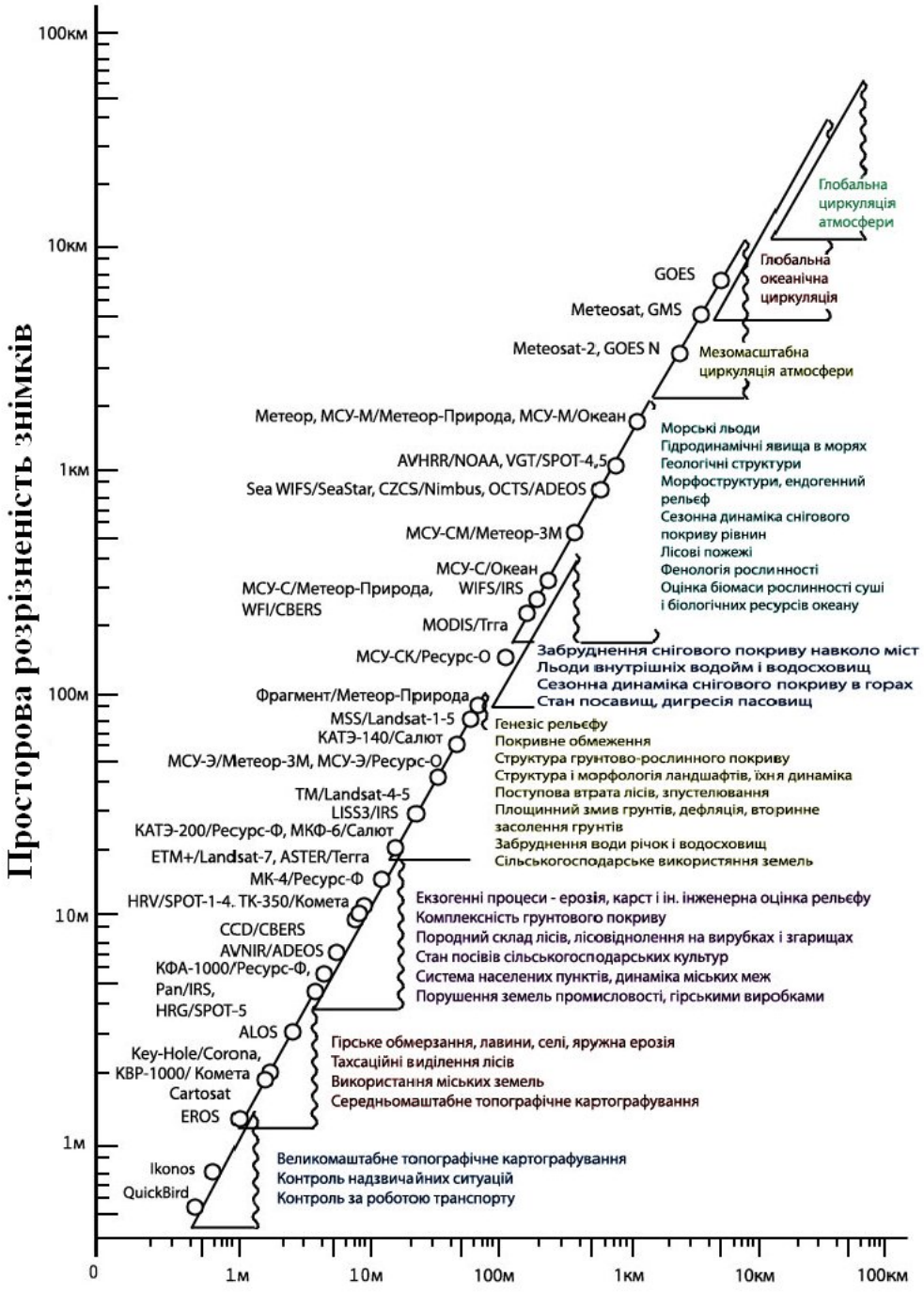


Рисунок 2.7. Співвідношення між просторовим розрізненням знімків і задачами, що вирішуються за цими знімками [39]

2.3 Цифрова обробка аерокосмічних зображень

Частина ДДЗ відразу надходить у цифровому вигляді, що дає змогу безпосередньо використовувати для їх обробки сучасні комп'ютерні технології. Знімки на фотоносіях можуть бути перетворені на цифрову растрову форму представлення за допомогою спеціальних сканувальних пристроїв (сканерів). Цифрове зображення у формі растра подано матрицею чисел. Кожний елемент цієї матриці (піксель) відповідає певній характеристиці (здатності відбивати, температурі тощо) ділянки місцевості в певній зоні електромагнітного спектру. *Піксел* ***(pixel)*** – це найменший елемент цифрового зображення, яскравість якого незмінна у межах цього елемента.

ДДЗ мають низьку особливостей, які істотно відрізняють їх від загаль-них зображень:

- дані ДЗЗ – це файли досить великого обсягу, для ефективної роботи з якими потрібні спеціальні засоби, зокрема особливі формати да-них;
- дані ДЗЗ – це багатовимірні дані, кількість і параметри спектральних зон знімання яких не дають змоги висвітлювати їх як RGB-зображення, крім того, можуть використовуватися також інші коор-динати вимірювання (наприклад, час);
- дані ДЗЗ потребують попередньої геометричної, радіометричної і радіаційної корекцій;
- дані ДЗЗ – це просторова інформація, що має, зазвичай, координат-ну прив'язку;
- можливість швидкого переходу від попередньої обробки і тематичного дешифрування до виконання операцій моделювання та просторового аналізу засобами геоінформаційних систем (інтеграція в ГІС).

Цифрову обробку даних ДЗЗ можна поділити на такі групи операцій:

- ❖ відновлення (корекція);
- ❖ попередня обробка;

ВПЗ

- ❖ класифікація;
- ❖ перетворення зображень;
- ❖ спеціалізована тематична обробка [36].

Відновлення (корекція) відеоінформації.

Основним завданням відновлення зображень є виправлення отримува-них даних для досягнення найправдоподібнішого зображення земної поверх-ні. ДДЗ містять багато випадкових, системних і систематичних спотворень, пов'язаних із впливом атмосфери, кривини Землі, руху знімального апарата щодо її поверхні у момент знімання, фізичними характеристиками давачів і каналів зв'язку, що використовуються. Для усунення численних спотворень з урахуванням їхньої специфіки використовують корекцію кількох видів: раді-аційну, радіометричну, геометричну і калібрування.

Радіаційне відновлення пов'язане з коректуванням кількості електро-магнітної енергії, що приймається кожним давачем, оскільки атмосфера не-однаково пропускає випромінювання різних ділянок спектрального діапазо-ну.

Калібрування полягає у перетворенні безрозмірних даних, що не мають виміру, отримуваних із давачів окремих спектральних зон, на істинно нормалізовані значення відбитої або випромінюваної енергії.

Ще одна операція радіометричної корекції пов'язана з усуненням спо-творень, що вносяться самими давачами і пристроями передавання та прий-мання даних (системних спотворень). Геометрична корекція, або трансфор-мація знімків, призначена для усунення спотворень, зумовлених кривиною і обертанням Землі, а також кутом нахилу орбіти супутника до площини еква-тора. Цей вид корекції на першому етапі може виконуватися автоматично за інформацією про параметри орбіти супутника. Більш точну трансформацію і прив'язку знімка до певної координатної системи, зазвичай, виконують з використанням опорних точок, що задаються інтерактивно. У процесі трансфо-рмації відбувається перерахунок значень пікселів на нову сітку растра, при

ВІЗ

цьому форми об’єктів на зображенні більшою чи меншою мірою змінюють-ся, а рамка знімка із звичайної прямокутної перетворюється на паралелепіпед або на складнішу фігуру з криволінійними межами.

Часто для представлення і сумісної обробки матеріалів різних видів (типів) знімання, а також різночасових знімків тієї самої території використ-товують проекцію, що має назву ортоплан. Її застосовують у світовій прак-тиці як обмінний стандарт. За геометричної корекції фотографічних зобра-жень високого розрізнення усуваються спотворення, що виникли внаслідок рельєфу місцевості.

Попередня обробка зображень.

Основне призначення цієї групи операцій – модифікація даних з метою поліпшення зорового сприйняття зображення або перетворення його у більш зручну форму для подальшого візуального або комп’ютерного аналізу. За особливостями організації обробки даних операції цієї групи можна поділити на кілька типів. До першого типу належать модифікації значень кожного окремого пікселя, виконувані зазвичай з використанням табличного способу представлення перетворювальної функції (таблиця перекодування). Різні ви-ди лінійного і нелінійного контрастування, призначені для покращення візуального сприйняття відеоінформації – характерні ознаки цих перетворень.

Другий тип – це локальні операції, особливістю яких є модифікація значення кожного елемента зображення з використанням значень сусідніх пі-кселів у певній обмеженій (локальній) зоні. Типовими перетвореннями цього виду є операції фільтрації зображень. Згладжувальні, або низькочастотні, фі-льтри дають змогу зняти шум і прибрати дрібні деталі, що дає можливість отримати більш однорідні ділянки зображення, придатні для подальшої об-робки з метою виявлення тих або інших об’єктів. Високочастотні фільтри призначені для виокремлення або підкреслення перепадів значень пікселів, що використовують під час пошуку на зображенні меж об’єктів і виявлення різних структур, що виявляються у вигляді зсуву або стрибка значень елементів зображення.

ВІЗ

Перетворення геометричних характеристик зображень складають тре-тій вид цієї групи операцій, до яких належать: монтаж (мозаїка) зображень з окремих знімків або їх фрагментів; вирізання потрібного фрагмента; стис-нення зображення або його розтягнення; трансформація знімка в ту чи іншу картографічну проекцію. Четвертий вид таких операцій призначений для створення різних колірних композицій, оптимальних для візуального сприйняття. Ця група перетворень дає змогу отримати кольорові зображення в умовних (фальсифікованих) і псевдокольорах, що є одним із способів обробки багатовимірних відеоданих.

Класифікація зображень.

Класифікація – це тематична обробка, яка дає можливість проводити автоматизоване розбиття знімків на однорідні за певним критерієм ділянки (класи об'єктів). Отримуване при цьому зображення називають тематичною картою. Оскільки зазвичай виокремлюють класи об'єктів, що змістовно інте-рпретуються, то класифікацію можна розглядати як процедуру автоматизованого дешифрування даних дистанційного зондування. Процедура класифікації найчастіше грунтується на статистичному аналізі різних характеристик зображення: просторових, спектральних або часових. До найпростіших корисних просторових характеристик належать: текстура, контекст, форма і стру-ктурні співвідношення. Під часовими характеристиками слід розуміти сезон-ні зміни земних покривів (особливо рослинності), які можуть слугувати їхні-ми індикаторами. Проте прийнято вважати, що основну інформацію про при-роду об'єктів на земній поверхні містять їхні спектральні характеристики. Тому в більшості відомих алгоритмів класифікації використовують спектра-льні образи (сигнатури) типів покриттів. Розрізняють два основні методологічні підходи до проведення цієї процедури: класифікацію з навчанням і автоматичну класифікацію. У разі класифікації з навчанням завдання полягає у виявленні на зображенні об'єктів уже відомих типів, що потребує деяких попередніх знань про досліджувану ділянку земної поверхні. На першому кроці процедури потрібно інтерактивно

ВІЗ

вибрати на зображенні еталонні ділянки, що є характерними (типовими) представниками класів виокремлених об'єктів. Етап навчання полягає фактично в розрахунку й аналізі деякого набору статистичних характеристик розподілу значень пікселів, що складають ці полігони.

Проте більшою популярністю користується інший вид класифікації, який не потребує додаткової наземної інформації і глибокого знання дистан-ційних методів обробки. Методологічною основою автоматичної класифіка-ції є кластерний аналіз, під час якого намагаються визначити всі типи об'єктів, що трапляються, за деякого рівня узагальнення (вибраних критеріїв об'єднання, розділення або кількості класів), а завдання їх інтерпретації розв'язується на другому етапі. Є алгоритми поєднання елементів класифіка-ції з навчанням і автоматичної.

За способом віднесення окремих елементів зображення до того чи ін-шого класу об'єктів розрізняють жорсткі і м'які класифікатори. У разі жорст-ких (традиційних) класифікаторів задається строго певне рішення щодо на-лежності пікселів до певного класу. М'які класифікатори оцінюють вірогід-ність, з якою аналізований елемент зображення може належати всім класам покриттів (зокрема й невідомі). Сучасні класифікатори дають змогу також вводити елемент невизначеності на різних стадіях процесу, що допускає наявність змішаних класів покриттів у кожному окремому пікселі (субпіксельна класифікація).

Ще один порівняно новий вид класифікації пов'язаний з обробкою гі-перспектральних даних. Такі дані надходять з експериментальних систем дистанційного зондування, які працюють з дуже вузькою шириною зон тради-ційного спектрального діапазону, що збільшує кількість спектральних кана-лів до десятків і навіть сотень. У цьому разі для автоматизованого виокрем-лення класів об'єктів покриттів використовують бібліотеки спектральних кривих різних земних об'єктів.

Часто виникає потреба в тематичному коректуванні результатів класи-фікації, особливо автоматичному, виконуваному фактично за інформаційни-

ВІТ

ми характеристиками об’єктів. Для цього використовують набір процедур, який називають операціями післякласифікаційної обробки: злиття класів, розділення класів, усунення дрібних помилкових об’єктів, згладжування меж об’єктів тощо. Важливим етапом у процесі класифікації є оцінка точності отриманих зображень, яка може виконуватися як за даними польових вимірювань, так і порівнянням з відповідними тематичними картами. Ця сфера обробки даних дистанційного зондування нині досить інтенсивно розвивається: з’являються нові класифікатори, що ґрунтуються на останніх досягненнях в галузі моделювання штучного інтелекту та інших галузях прикладної математики (наприклад, нейронні мережі).

Перетворення зображень.

Ця група операцій дає змогу створювати нові (вторинні) зображення в процесі математичних перетворень кількох спектральних зон первинного зо-браження. Цей вид операцій часто називають алгеброю зображень. До видів вторинних зображень, що широко використовуються, належать різні вегета-ційні індекси, які обчислюють як лінійну комбінацію ІЧ інфрачервоний і чер-воного спектральних каналів. Інший приклад вторинних відеоданих – зобра-ження головних компонент первинного знімка. Аналіз головних компонент використовують для перетворення кількох спектральних зон знімка так, щоб нові зони вторинного зображення (їх називають компонентами) не корелювали одна з одною і розміщувалися в порядку зменшення кількості інформації, яку вони містять. Кожний такий компонент завжди несе лише властиву йому інформацію, причому перші кілька нових зон містять більшу частину інформації про первинне зображення.

Спеціалізована тематична обробка.

До цієї групи належать операції виокремлення будь-яких специфічних природних або антропогенних об’єктів. Зазвичай такі об’єкти дешифруються саме за їхніми характерними особливостями. Цей тип містить операції, призначені для виявлення і виокремлення лінійних або кільцевих структур [36].

ВГЗ

2.4 Методи цифрової обробки космічних знімків

Методи обробки зображень поділяють на дві групи, призначені для часткового або повного комп'ютерного вирішення поставленого завдання [36]:

➢ методи, що забезпечують перетворення яскравості і геометричні перетворення знімків; вони спрямовані на поліпшення візуального дешифрування, підвищення його об'єктивності і достовірності, а також на підготовку знімків до подальшого автоматизованого де-шифрування і створення карти;

➢ методи автоматизованого дешифрування – класифікація об'єктів за знімками з використанням апріорної інформації про ознаки класів, що виокремлюються, або без неї.

Обробка зображень складається з трьох етапів: попередня обробка**,** поліпшення зображень**,** класифікація. За допомогою цих операцій можна усунути систематичні похибки давача і підвищити достовірність даних.

Зазвичай, обробка зображень – це обробка цифрових даних, оскільки саме в цифрових форматах отримують дані, до того ж так простіше здійсню-вати обробку і зберігати інформацію.

Перетворення яскравості знімків

Методи поліпшувальних перетворень зазвичай застосовують як пер-ший крок у використанні знімків: для ідентифікації зображених територій і об'єктів, визначення їх місця розташування і для отримання інформації про їх зображувальні властивості та ознаки. Вибір процедури поліпшення зале-жить від кваліфікації користувача, його досвіду дешифрування. При цьому користувач повинен:

- знати параметри діапазонів знімання, що використовуються, до виконання процедур поліпшення;
- мати чітке уявлення про мету дослідження і його очікуваний результат (наприклад, підвищення контрасту зображення для іденти-

ВПЗ

фікації об’єктів або побудова навчальних вибірок для автоматизо-ваного дешифрування).

Перетворення яскравості містить два типи операцій:

- радіометричну і геометричну корекції знімків, які виконують для усунення дефектів, пов’язаних із технологічними властивостями системи реєстрації та/або умовами знімання;
- поліпшення якості цифрових зображень.

Радіометрична і геометрична корекції цифрових знімків

Знімки, які первісно отримують з ШСЗ, записані у вигляді так званих «сірих значень» яскравості (DN, Digital Number). Задачі радіометричної корекції полягають у перетворенні цих значень у фізичні одиниці (базуючись на калібруванні); усуненні впливу відмінностей освітленості, обумовлених гео-метрією знімання, атмосферою, рельєфом, збоєм або несправністю детекто-рів; усуненні дефектів зображення [30].

Об’єкти зондування відзняті в різні дати надзвичайно різноманітні та їх майже неможливо порівняти в автоматичному режимі [95]. Для того, щоб ви-явити справжні зміни ландшафту, на які вказують зміни в поверхневому від-битті супутникових зображень, необхідно проводити їх радіометричну коре-кцію.

Методи радіометричної корекції показників давачів, зазвичай, надають розробники конкретної знімальної апаратури. Таку корекцію виконують для зображень, отриманих у видимій та ІЧ ділянках спектра. Найважче піддаєть-ся корекції вплив рельєфу, що потребує ґрунтовного знання основ фотограм-метрії, території, характеристик системи та умов знімання. Особливу увагу приділяють обліку впливу атмосфери [36].

Вплив атмосферних ефектів на дані дистанційного зондування не розг-лядають як похибку, такі ефекти є частиною отримуваного давачем сигналу. Проте, часто їх важливо усунути, особливо з метою «підбору» яскраво-сті кадрів і аналізу змін.

ВІТЗ

Алгоритми корекції змін властивостей відбиття об’єктів, переданих че-рез атмосферу, розробляють протягом багатьох років існування дистанційно-го зондування. Основними є чотири категорії: віднімання темних пікселів; перетворення показника енергетичної яскравості на коефіцієнт відбиття; дослідження лінійної регресії; моделювання впливу атмосфери.

Радіометрична корекція цифрових космічних знімків.

Радіометричне спотворення КЗ – це порушення пропорційності відт-ворення яскравісних характеристик об’єктів зондування на зображенні. Ра-діометричне коригування КЗ (radiometric correction) – це виправляння радіо-метричних спотворень КЗ [19].

В оптичних та ІЧ системах радіометричну корекцію проводять у два етапи:

1 -й етап – встановлення взаємозв’язку між величиною пікселя і відпо-відним фізичним параметром випромінювання (зазвичай це спектральне випромінювання), що потрапляє на давач. Ця процедура виконується внутрішнім калібратором давача, який визначає максимальне і мінімальне значення пікселя. Наприклад, для 8-бітових даних це значення перебуватиме в межах від 0 до 255. Значення пікселя перетвориться на значення прийнятого випромінювання;

2- й етап – облік ефектів поширення для того, щоб величина прийнятого випромінювання трактувалась як випромінювання досліджуваної поверхні. Це досягається введенням поправок за вплив атмосфери [36].

До запуску на орбіту характеристики супутникової знімальної системи, такі як мінімальна і максимальна величина випромінювання, яка може бути зареєстрована приймачем, лінійність передачі яскравостей в діапазоні, що реєструється, ретельно досліджується в лабораторії для розрахунку каліброва-них коефіцієнтів і констант.

Для приведення до єдиної системи фізичних показників при дотриман-ні лінійного закону передачі значень яскравості, калібрування багатозональ-

ВІЗ

них знімків в оптичному діапазоні (перерахунок DN на реальні значення випромінювання на апертурі сенсора) здійснюється за простим законом:

$$B_{\lambda} = K_{\lambda} \cdot DN \cdot C_{\lambda}, \quad (1.1)$$

де B_{λ} – це енергетична яскравість для спектральної зони λ; DN – «сирі значення» яскравості; K_{λ} – калібрувальний коефіцієнт підсилення (gain); C_{λ} – калібрувальна константа зміщення (offset), яка відповідає мінімальній величині яскравості, що реєструється. Значення K_{λ} і C_{λ} розповсюджуються разом з цифровими знімками у вигляді спеціального калібрувального файлу. Для більшості сучасних знімальних систем проводиться періодичне калібру-вання на борту супутника по внутрішнім або зовнішнім калібрувальним об'єктам, що дозволяє періодично оновлювати K_{λ} і C_{λ}. Оновлені значення надходять із новими отриманими знімками, публікуються в науковій і спеці-альній літературі, в мережі Інтернет для загального користування.

Якщо є необхідність у кількісному порівнянні знімків, отриманих у різний час, то для врахування різної освітленості здійснюють перерахування значень спектральної енергетичної яскравості, обчислюючи відношення ρ_{λ} відбитого потоку випромінювання до падаючого, %:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi B D^2}{J_{\lambda} \cos Z}, \quad (1.2)$$

де D – відстань від Землі до Сонця в астрономічних одиницях на конкретну дату; J_{λ} – середня сонячна позаатмосферна енергетична освітленість, Вт/(м^2·нм); Z – зенітна відстань Сонця (кут, що доповнює висоту Сонця до 90°); D і J_{λ} беруть із довідкових таблиць, а Z – з калібрувального файлу, що супроводжує цифровий знімок [30].

ВІЇВ

Атмосферна корекція цифрових космічних знімків.

Атмосферне спотворення космознімка – це спотворення зображення, зумовлене впливом атмосфери на розповсюджування електромагнітних хвиль між технічним засобом ДЗЗ та об'єктом зондування. *Атмосферне коригування космознімка* (atmospheric correction) – це виправляння атмосферних спотворень КЗ [19].

Основною складністю для отримання якісного зображення дистанцій-ними системами є ефекти під час поширення світлового випромінювання в атмосфері Землі. За відсутності атмосфери для визначення відбивальної здатності поверхні Землі було б достатньо визначити освітленість і геометричні параметри. Проте наявність атмосфери дуже ускладнює залежність між сонячним випроміненням і випроміненням, яке визначає давач. На рис. 2.8 промінь *А* є прямою освітленістю поверхні Землі Сонцем, промінь *Б* – освітленістю поверхні світлом, розсіяним атмосферою. Промені *В* і *Д* показують можливі напрямки розсіювання поверхнею світла і при цьому промінь *В* може розсіятися назад на поверхню. Промінь *Г* потрапляє прямо на давач, а промінь *Д* потрапляє на давач після розсіювання в атмосфері. Промінь *Е* показує, що частина сонячного світла може розсіятися в атмосфері і надійти прямо на давач.

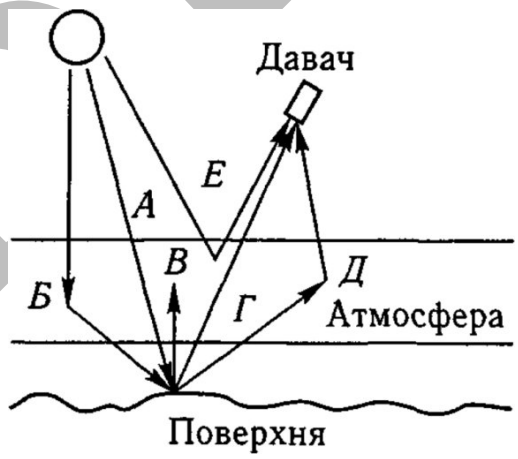


Рис. 2.8. Схема впливу атмосферного розсіювання світла

РДГЗ

Отже, лише проходження променів *А* і *Б* є простим випадком без ура-хування впливу атмосфери, а решта променів є наслідком розсіювання в ат-мосфері. Слід зазначити, що в бортових аеросистемах такий вплив атмосфери менший, ніж у супутникових системах.

Коректування параметрів зображення з урахуванням впливу атмосфери на поширення світла здійснюється трьома методами.

Перший – це *метод математичного моделювання*. Розсіювання в ат-мосфері та параметри поглинання обчислюють за допомогою комп'ютерних програм. Найпопулярнішими є програми LOWTRAN, MODTRAN, 5S/6S. Початковими даними слугують метеорологічні показники, сезонні та геогра-фічні параметри. Слід зазначити, що визначити деякі характеристики атмос-фери, наприклад аерозольні, дуже складно [36].

Згідно до цього методу, необхідним є розв'язання рівняння переносу випромінювання. Складність, насамперед, полягає у необхідності наявності інформації про оптичну товщу атмосфери τ над об'єктами знімання. Найкращим вирішенням цього питання було би встановлення по всій поверхні Землі великої кількості сонячних спектрофотометрів, що вимірюють інтенсивність сонячного випромінювання I, яке пройшло крізь атмосферу, в різних ділян-ках спектра. У дійсності, зазвичай, використовують дані з небагатьох спектрофотометрів, встановлених на поверхні суші, або застосовують непрямі методи корекції.

Атмосферну корекцію над морями та океанами виконувати простіше, тому що в червоному та ІЧ діапазонах спектру поверхня води за своїми опти-чними властивостями є близькою до абсолютно чорного тіла. Істотно вищий коефіцієнт відбиття та розсіювання мають димки, тумани та хмари, їх добре видно на фоні води. Це дозволяє оцінити оптичну товщину.

Теоретичною основою методу обчислення оптичної товщини τ є закон Бугера, згідно до якого за відомим значенням інтенсивності сонячного випромінювання I_0 за межами атмосфери можна визначити інтенсивність сонячного випромінювання в точці знімання:

ВІТЗ

$$I = I_0 e^{-\tau \sec Z} .$$

На практиці аерозольна оптична товщина визначається за формулою:

$$\tau_a(\lambda) = \frac{\ln I_0(\lambda) - \ln I(\lambda)}{m \left[\tau_R(\lambda) + \tau_g(\lambda)\right]},$$

де $I_0(\lambda)$, $I(\lambda)$ – спектральні інтенсивності сонячного випромінювання поза атмосферою та в точці спостереження для певної довжини хвилі λ ; $\tau_R(\lambda)$, $\tau_g(\lambda)$

– оптичні товщини релеєвського розсіювання та газового поглинання; m – оптична маса, яка є функцією зенітного кута Сонця. Отже, для отримання інформації про аерозольну оптичну товщу атмосфери, необхідним є вимірювання прямого сонячного випромінювання $I(\lambda)$, визначення величини m у момент спостереження Сонця (ґрунтуючись на вимірюванні його зенітного кута або розрахунках за часом і координатами) та використанні модельних зна-

чень $\tau_R(\lambda)$ і $\tau_g(\lambda)$, наприклад, за моделлю LOWTRAN [35].

Розраховані декілька «стандартних станів атмосфери», які враховують географічне положення району та сезон знімання, наприклад «літо в помір-них широтах». Для вибору параметрів моделі можуть бути використані дані метеорологічних супутників, отримані в день знімання. Для розробки і уточнення подібних моделей виконують підсупутникові експерименти, у ході яких одночасно зі зніманням проводяться наземні вимірювання відбивальної здатності об'єктів і параметрів стану атмосфери, які потім враховуються при корекції значень яскравості на знімку [30].

Другий метод корекції зображення, отриманого дистанційними систе-мами, ґрунтується на *калібруванні цілі*. Для здійснення корекції потрібно ви-конати такі умови:

- слід знати показники розсіювання з заданою точністю для певного спектрального діапазону;
- діапазон показників розсіювання калібратора має охоплювати показник розсіювання об'єкта;

ВГЗ

- кожний калібратор має забезпечувати охоплення області щонайменше в кілька пікселів;
- калібратор має забезпечувати налагодження на різні атмосферні умови.

Метод ґрунтується на вимірюванні щільності аерозолі (у видимому та ближньому ІЧ діапазонах) або водяної пари (у дальньому ІЧ діапазоні) одночасно з формуванням зображення. Наприклад, на метеорологічному космічному апараті NOAA (США) разом із сенсором AVHRR, який формує зображення, встановлено сенсор HIRS (High Resolution Infrared Radiometer Sounder) – ІЧ радіометр-ехолот високої розрізненності для атмосферної корекції. Значимість атмосферної корекції КЗ збільшується разом зі збільшенням розрізненності знімків [35].

Третій, найпростіший і найпоширеніший спосіб корекції зображення, отриманого дистанційними системами, ґрунтується на *видаленні темних пікселів*. Метод видалення значень темних пікселів зображення ґрунтується на припущенні, що піксель з найнижчим радіометричним показником яскравос-ті в кожній зоні має бути насправді нулем, а його ненульове значення є результатом адитивних перешкод, спричинених атмосферою (причому, найбільш сильно у короткохвильовій частині спектру). Такі пікселі відповідають, наприклад, ділянкам глибокої тіні у видимій частині електромагнітного спектру, яскравості чистої водної поверхні глибокого водоймища у ближній ІЧ. Процедура видалення пікселів є аналогом зсуву початку відліку яскравості. Звичайно, таке припущення дуже спрощено відображує реальність, проте його часто застосовують для усунення ефекту «атмосферної димки». Зображення ІЧ радіометрів, які вимірюють температуру яскравості випромінювання, що надходить на давач, і мають похибку визначення температури 10 К і більше через вплив атмосфери на поширення теплового ІЧ випромінювання, також піддаються коректуванню з урахуванням впливу атмосферних ефектів [30, 36].

ВІТЗ

3. Спектральне дешифрування рослинного покриву.

3.1 Поняття про спектральну яскравість природних об'єктів

Оскільки дистанційне вивчення рослинності засноване на реєстрації відбитого ними сонячного випромінювання, важливо знати їх відбивну здатність. Поміж характеристик відбивної здатності – інтегральних і спектральних альбедо, яскравості, індикатриси відбиття – найбільше значення має спектральна яскравість [39].

Для кількісних характеристик взаємодії випромінювання з об'єктами використовують *абсолютні та відносні величини*. Для абсолютних вимірювань застосовують дві системи:

1) *світлову, або фотометричну (в люменах)* – тільки у видимому діапазоні хвиль;
2) *енергетичну, або радіометричну (в Ватах)* – у всіх діапазонах електромагнітного спектру.

При відносних вимірюваннях використовують коефіцієнти відбиття, поглинання, розсіювання і пропускання, сумарне значення яких завжди дорівнює одиниці (закон збереження енергії).

Для аерокосмічного вивчення об'єктів суши найбільший інтерес являє відбите випромінювання, яке визначає їх оптичні характеристики.

Первісною оптичною відбивною характеристикою об'єктів є їх яскра-вість. На неї впливає освітленість, що складається з освітленості прямим со-нячним світлом, розсіяним світлом небозводу і світлом, відбитим від сусідніх об'єктів.

Для об'єктів земної поверхні найбільш важливими є *коефіцієнти інтегральної та спектральної яскравості, яркісний контраст та індикатри-са відбиття*.

Коефіцієнт інтегральної (ахроматичної) яскравості r^* характеризує відносну величину відбитого потоку випромінювання в заданому напрямку у

ВІГЗ

порівнянні з освілювальним потоком. Він визначається як відношення яскравості об'єкта B^* до яскравості абсолютно білої матової поверхні (еталона) B_0^*

$$r^* = \frac{B^*}{B_0^*}.$$

У таблиці 3.1 наведені значення деяких коефіцієнтів інтегральної яскравості r^*, визначених у напрямку зеніт-надир, які свідчать про їх значні коливання у різних об'єктів. Для одного й того ж самого об'єкта коефіцієнт r^* не є строго постійним, а може змінюватися в певних межах.

Таблиця 3.1 - Коефіцієнти інтегральної яскравості деяких об'єктів (видимий діапазон)

Об'єкт	r^*	Об'єкт	r^*
Сніг свіжий	1,00	Ліс листяний	0,07
Лід річковий	0,30	Ліс хвойний	0,05
Вода	0,03	Луг суходільний	0,07
Пісок кварцовий	0,20	Дороги ґрунтові на суглинку і піску	0,20
Ґрунт сірий лісовий	0,15	Дороги ґрунтові на чорноземі	0,08
Ґрунт чорнозем	0,03	Шосе	0,30

Якщо ділянка місцевості розглядається як сукупність n окремих об'єктів площею $\bar{S}_i$, у межах якої r_i^* є постійним, то *середнє значення коефіцієнта інтегральної яскравості* $r_{сер}^*$ для ділянки в цілому можна представити таким чином:

$$r_{сер}^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} r_i \bar{S}_i}{\sum_{i=1}^{n} \bar{S}_i}.$$

У відповідності з двома системами вимірювань абсолютну енергетичну яскравість виражають у Ватах на стерадіан-квадратний метр (Вт·ср$^{-1}$ · м$^{-2}$), а фотометричну – в канделах на квадратний метр (кд·м$^{-2}$).

ВІТЗ

Необхідно враховувати, що абсолютна величина яскравості, яка обумо-влена властивостями об'єкта відбивати випромінювання, також функціона-льно залежить від відносного положення Сонця, знімальної системи й об'єкта, а також від нахилу відбиваючої поверхні, тобто від рельєфу місцево-сті [30].

Контраст яскравості застосовують для характеристики відмінностей яскравості двох об'єктів (або суміжних деталей одного об'єкта), яскравості яких B_1^* і B_2^* ($B_2^* > B_1^*$). Найпоширенішими є *відносний контраст* $K_{відн}$

$$K_{відн} = \frac{B_2^*}{B_1^*}$$

и так званий *візуальний контраст* $K_в$:

$$K_B = \frac{B_2^* - B_1^*}{B_2^*} = 1 - \frac{1}{K_{відн}}.$$

Контраст між найбільш світлими B_{max}^* і темними B_{min}^* об'єктами визначає інтервал яскравостей місцевості U, який виражається формулою:

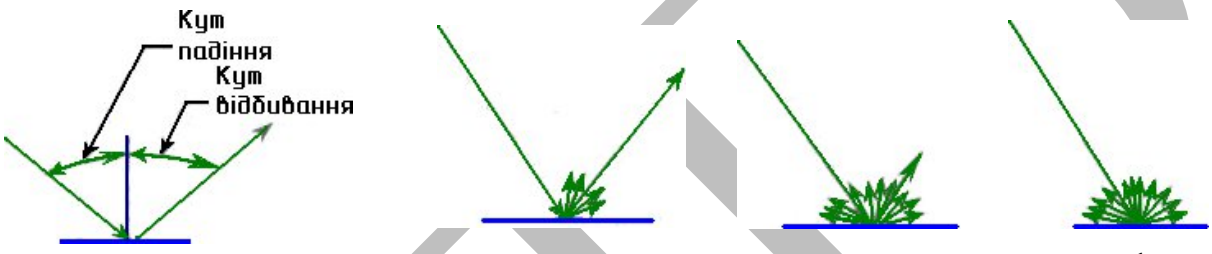
$$U = \frac{B_{max}^*}{B_{min}^*}.$$

Влітку для лісових гірських районів U становить 100, а для степових – 2. У цілому земна поверхня є малоконтрасною: близько половини всіх об'єтів мають відносний контраст менше 1,5.

Сукупність коефіцієнтів яскравості об'єкта по різних напрямках зобра-жують графічно у вигляді полярної діаграми – *індикатриси відбиття*. Є чо-тири основні види індикатрис відбиття (рис. 2.1). Властивістю дзеркального відбиття володіють спокійна водна поверхня, льодовий покрив, накатані ґрунтові дороги. Слабко шорсткуваті поверхні відбивають світло рівномірно (дифузно) у всіх напрямках. Так індикатриса називається *ортотропною* і її повинен мати розсіювач, який приймається в якості еталона. у природі до нього наближаються плоскі піщані поверхні. Об'єкти з розчленованою поверхнею мають індикатрису відбиття, витягнуту до джерела світла, тобто про-

ВПЗ

тилежну індикатрисі дзеркальної поверхні. Максимальна яскравість таких об'єктів (поорані ґрунти, заросли очерету) спостерігається зі сторони падаючих променів. Асиметрія індикатрис зростає зі збільшенням розчленованості відбиваючої поверхні. Строго кажучи, будь-яке відбите випромінювання складається з двох частин – дзеркальної та дифузної. Тому для багатьох природних об'єктів характерною є змішана індикатриса відбиття з двома макси-мумами: один спрямований у бік дзеркального відбиття, інший – до джерела світла (Сонця). Індикатриси відбиття впливають на особливості зображення однієї й тієї ж місцевості на знімках, отриманих при різних напрямках знімання [30].



а – ідеальний дзеркальний відбивач

б – квазідзеркальний відбивач

в – квазідифузний відбивач

г – дифузний відбивач (поверхня Ламберта)

Рисунок 3.1. Дзеркальне і дифузне відбиття

Яскравість об'єктів земної поверхні в різних спектральних зонах є неоднаковою та характеризується *коефіцієнтом спектральної яскравості* r_{λ} . Коефіцієнт спектральної яскравості являє собою відношення величини відбиття даної та ідеальної поверхонь, яка відбиває 100% світла усіх довжин хвиль (еталону). Цей коефіцієнт визначається за формулою:

$$r_{\lambda} = \frac{B_{\lambda}}{B_{0\lambda}},$$

де B_{λ} і $B_{0\lambda}$ – спектральні яскравості об'єкта та еталона. В якості еталону використовують матеріали з добре відомими і стабільними в часі оптичними характеристиками (гіпсові пластинки, молочні стекла), які освітлюються Сонцем або вбудованими в спектрометри каліброваними джерелами світла [30].

Отже, *коефіцієнт яскравості поверхні* в даному напрямку і при даних умовах освітлення є відношення яскравості цієї поверхні до яскравості ідеа-льного розсіювача, що знаходиться в тих же умовах освітлення. Під ідеаль-ним розсіювачем розуміють ортотропну поверхню, яка повністю відбиває за законом Ламберта увесь падаючий на неї променистий потік.

Коефіцієнт відбиття (альбедо) ρ є відношення повного потоку F_2, ві-дбитого у всіх напрямках, до повного потоку F_1, який падає на дану поверх-ню в нормальному напрямку [41]:

$$\times \bullet \frac{F_2}{F_1 E} \bullet \frac{R}{},$$

де R – світність поверхні, E – освітленість поверхні [41].

З погляду оптики, рослина є фізичним об’єктом, який у разі освітлення сонячним випромінюванням частково відбиває його, частково поглинає і частково пропускає. Якщо брати до уваги інтегральні (по усьому спектру) характеристики випромінювання, то оптичні властивості рослини характеризуються *коефіцієнтом відбиття, коефіцієнтом поглинання та коефіцієнтом пропускання*. Для дослідження випромінювання на якій-небудь фіксованій довжині хвилі користуються відповідними спектральними коефіцієнтами. Іноді замість спектрального коефіцієнта відбиття використовують *коефіці-єнт спектральної яскравості*, під яким розуміють відношення яскравості у певному напрямку до яскравості ідеального розсіювача, який розсіює випромінювання рівномірно по усіх напрямках півсфери [1].

Значення коефіцієнтів спектральної яскравості для різних довжин хвиль подають у вигляді графіка – *кривої спектральної яскравості*. По го-ризонтальній осі позначають довжини хвиль електромагнітного спектру, по вертикальній – коефіцієнти спектральної яскравості.

На знанні спектральної яскравості об’єктів ґрунтуються різні способи та технології одержання аерокосмічних знімків (багатозональне, гіперспект-ральне знімання) та їх обробки, у тому числі і автоматичне розпізнавання об’єктів по знімках. А тому вивчення спектральної відбивної здатності ґрун-

ВІЗ

тів є однією з задач аерокосмічних методів. Основним шляхом вивчення спектральної відбивної здатності є експериментальний при проведенні лабораторного, польового або аерокосмічного спектрометрування. Криві спектральної яскравості основних класів природних об'єктів показані на рис. 3.2.

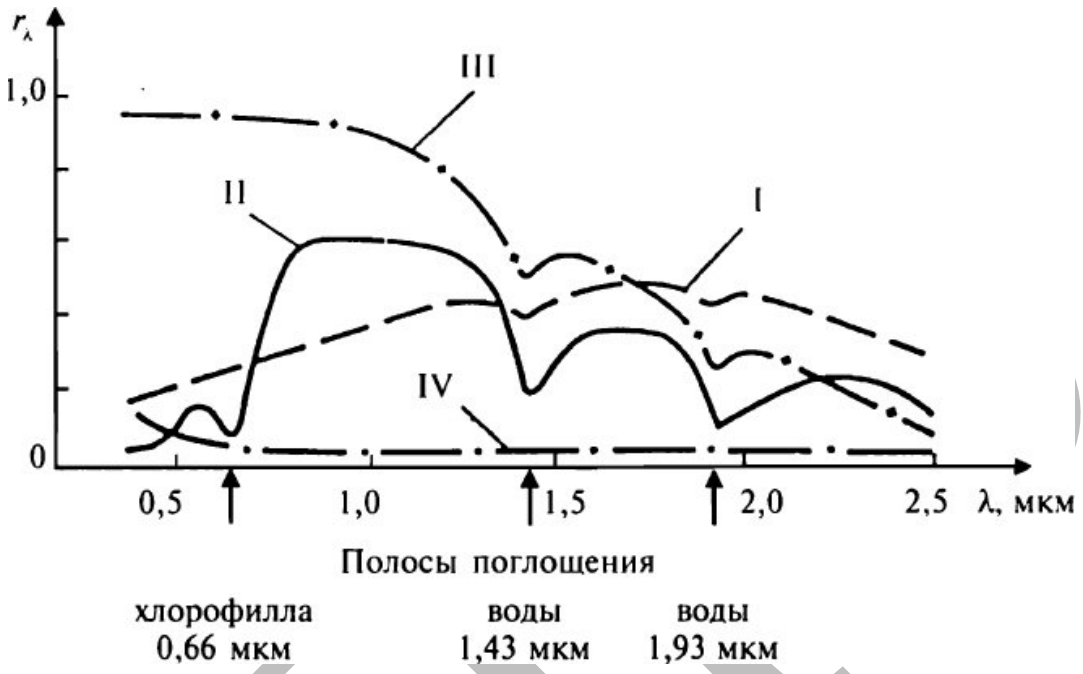


Рисунок 3.2. Криві спектральної яскравості основних класів природних об'єктів: I – горні породи та ґрунти; II – рослинний покрив; III – сніжний покрив; IV – водні поверхні

Фундаментальні дослідження по спектрометруванню виконав радянсь-кий вчений Є. Л. Кринов ще в 1940-х рр. [41]. Поклавши початок роботам з оптики ландшафтів, він розробив першу спектрометричну класифікацію, яка з часом стала класичною [39].

Поняття про простір спектральних ознак

Окрім представлення коефіцієнтів r_{+} у вигляді кривих спектральної яскравості, їх застосовують для характеристики об'єкта в так званому *просторі спектральних ознак*, який графічно відображує співвідношення спектраль-них яскравостей в найбільш інформативних зонах спектра. Для цього значен-ня яскравості (або коефіцієнтів спектральної яскравості) у

вибраних зонах,

Наприклад, червоній і близькій ІЧ відкладають вздовж різних осей прямокутної системи координат на площини, які в цьому випадку представляють двовимірний простір спектральних ознак (рис. 3.3).

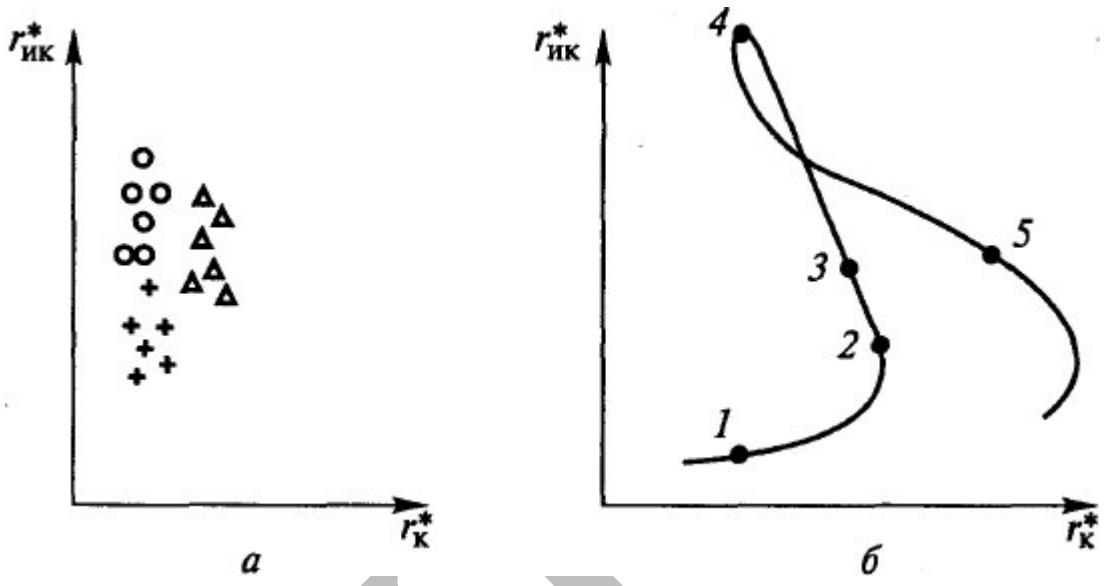


Рисунок 3.3. Простір спектральних ознак

На рис. 3.3: а – представлення трьох різних сільськогосподарських куль-тур у двовимірному просторі спектральних ознак за даними багаторазових вимірювань; б – крива розвитку зернової культури у двовимірному просторі спектральних ознак (1 – ґрунт, 2 – сходи, 3 – колосіння, вихід в трубку, 4 – молочна спілість, 5 – воскова спілість); r_i^*, $r_ч^*$ – коефіцієнти спектральної яскравості, відповідно, у ближній ІЧ і червоній зонах спектра.

Положення точки, яке визначається двома плоскими координатами (вектором), характеризує конкретний об’єкт або його стан. Оскільки спектральні яскравості одного і того ж об’єкта, як правило, варіюють в деяких межах, то в просторі спектральних ознак такому об’єктові відповідатиме не одна точка, а ціла область (рис. 3.3, а). Якщо ж при спостереженні мінливого об’єкта протягом певного часу отримано серію значень спектральної яскравості, то їх набір дозволяє побудувати криву, форма якої в просторі спектральних ознак ще більш надійно ідентифікує об’єкт. При дешифруванні знімків виділяють

ВП

особливу дешифрувальну ознаку, яка називається *часовим образом об'єкта*. Наприклад, зміна спектральної яскравості сільськогосподарської культури протягом року ілюструє так звана крива її розвитку, тобто часовий образ культури (рис. 2.3, б).

Загальне уявлення про простір ознак, який може бути багатомірним, є принципово важливим і широко застосовується при комп'ютерній обробці знімків [30].

3.2 Спектральна відбивальна здатність рослин

Відмінності в рослинності викликають конвекційний рух повітря, а на спектрозональних зображеннях багатозональних знімальних систем призводять до змін у залежності від властивостей рослинності, тональності та текстури образів. При багато спектральному зніманні стало можливим за залеж-ними від довжини хвилі випромінювання відбивальним, поглинальними і те-пловим характеристикам рослин виділяти лугові трави, групи чагарників або ліса більш точно, ніж на чорно-білих і навіть на кольорових ІЧ аерофотозні-мках. За допомогою числових методів запису та обробки спектральних і багатозональних знімків, які відображують відмінності спектральних характеристик рослинних угрупувань у вигляді зображення зі збільшеною контраст-ністю.

Цікавими є, насамперед, методи, які дозволяють отримати кореляцію та комбінацію спектральних даних по двох або більше каналах.

Для того, щоб вибрати для знімань закритих рослинами районів необ-хідні спектральні канали і за зареєстрованою датчиками спектральній інтенсивності зробити висновок щодо однорідності або змішаному видовому складі рослинності або про аномальні умови її виростання, необхідно користувачеві ДДЗ мати основні уявлення про фізичні і фізіологічні причини відмінностей спектральних характеристик рослин та їх угрупувань. У першу чергу необхідно знати зовнішні фактори, з яких складається взаємодія пада-

ючого потоку сонячного випромінювання і рослини і які впливають на спектральний сигнал рослин або їх угрупувань [42].

Спектральна відбивальна здатність лісових насаджень і чагарників Спектральна відбивальна здатність лісових насаджень і чагарників під-

дана значним змінам у залежності від пори року та фази вегетації. Однак, великих відмінностей у відбивній здатності окремих порід або віків деревостою у певну фазу вегетації не спостерігається. Тому всі криві відбиття лісових насаджень і чагарників були об'єднані в наступні чотири групи, що відображують певні типи (рис. 3.4).

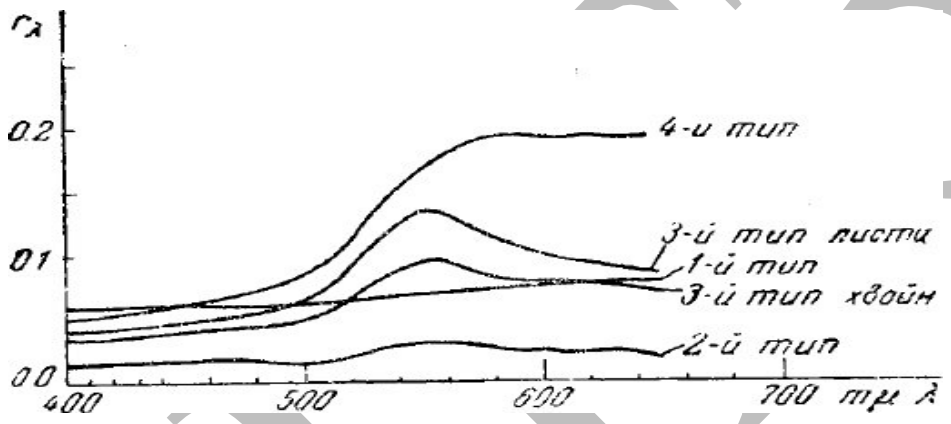


Рисунок 3.4. Типові спектральні криві відбиття лісових насаджень

Тип 1. Відбивна здатність поступово і небагацько зростає від фіолетово-го до червоного кінця спектра, залишаючись майже без змін на всій ширині ІЧ області спектру і зберігає той рівень, який вона досягає в червоній ділянці. Таким чином, криві даного типу відповідають майже нейтрально сірому фону з ледве помітним жовтуватим або буруватим відтінком.

Тип 2. Відбивна здатність у всій видимій області спектру залишається на досить низькому рівні (r_{+} ● 0,02˜ 0,05); біля ✧ ● 550 *нм* спостерігається слабкий максимум. В ІЧ області відбивна здатність є підвищеною, однак значення коефіцієнтів яскравості не перевищує 0,10-0,20, що є невисоким для

рослинних утворень. Таким чином, криві другого типу відповідають темно-зеленому мало насиченому фону.

Тип 3. Відбивна здатність у видимій області спектру є помітно вищою, ніж у попередньому випадку, тим не менш вона залишається загалом невисокою. Максимум є в жовто-зелених променях, близько ✦ ● 550 *нм*, обумовлений насиченим зеленим забарвленням рослинності, виражений значно різкіше. Відбивна здатність у ІЧ області спектра, починаючи з ✦ ● 700 *нм* різко зростає і залишається дуже високою на всій ширині цієї області спектру – це

проявлення так званого ефекту Вуда, причому коефіцієнт яскравості досягає 0,6-0,7.

Тип 4. Відбивна здатність у короткохвильовій половині видимої області спектру (✦ ● 400 ❦ 550 *нм*) залишається загалом такою ж, як і в попередньому випадку. Однак далі по спектру відбивна здатність більш або менш різко зростає і залишається високою на всій ділянці оранжево-червоної ділянки видимої області і в ІЧ області спектру. Криві четвертого типу відповідають оран-жево-червоному фону.

Отже, базуючись на зробленому поділі кривих відбиття лісових наса-джень і чагарників, відбивну здатність останніх можна описати наступним чином.

У зимовий період відбивна здатність всіх насаджень листяних порід мо-же бути віднесена до першого типу. В зазначений період всі насадження ма-ють загалом сірий тон з незначними жовтуватими або буруватими відтінка-ми. Тим не менш відмінність у відношенні загальної яскравості для різних порід може бути досить значним. Так, зіставляючи криві відбиття окремих порід і різних віків деревостою, можна легко помітити, що найбільш темними є береза і модрина молодих деревостоїв, середній коефіцієнт яскравості яких приблизно дорівнює 0,05. Більш світлим є дуб молодого деревостою, коефіцієнт яскравості якого дорівнює в середньому 0,06. Ще більш світлими є ли-па спілого деревостою та осина молодого деревостою, з середнім коефіцієн-

ВГЗ

том яскравості 0,08. Найбільш світлою, з коефіцієнтом яскравості 0,09, є береза спілого деревостою. Більш висока відбивна здатність останньої поясню-ється, напевне, впливом високої відбивної здатності стволів і товстих гілок, покритих білою корою. Згідно результатів вимірювань, спектральна відбив-на здатність кори дійсно є досить високою, причому значення коефіцієнта яскравості в середньому досягає 0,22.

Хвойні породи лісових насаджень у зимовий період за характером спектральної відбивної здатності можуть бути віднесені до другого типу. Криві відбиття хвойних насаджень мають слабкий максимум у жовто-зелених променях, відповідно до мало насиченого зеленого забарвлення старої хвої на деревах. За кривими відбиття можна помітити, що найбільш темною є сосна спілого деревостою, коефіцієнт яскравості якої навіть у максимумі (✦ ● 550 *нм*) дорівнює лише 0,021. Тому сосну слід віднести взагалі до самих темних природних утворень.

З настанням періоду вегетації, коли в листяних насаджень з'являється молоде листя, а у хвойних – голки молодої хвої, відбивна здатність помітно змінюється й може бути віднесена до третього типу. У цей період усі насадження, незалежно від породи й віку, мають різко виражений максимум у жовто-зелених променях, близько ✦ ● 550 *нм*. Поряд із цим різко зростає від-

бивна здатність у всій ІЧ області спектра. Якщо порівняти між собою криві відбиття різних порід, можна виявити наступне.

1. У видимій області спектра (✦ ● 400 ❦ 650 *нм*) всі криві, незалежно від породи, віку й фази вегетації, мають більш-менш однаковий хід по спектру. Так, починаючи з фіолетового кінця спектра (✦ ● 400 *нм*) і до ✦ ● 500 *нм* криві дуже полого підіймаються нагору. Потім з ✦ ● 500 *нм* до ✦ ● 550 *нм* спостерігається дуже крутий підйом, що досягає максимуму близько ✦ ● 550 *нм* . Після цього криві більш-менш полого опускаються, залишаючись на всій

ширині довгохвильової ділянки видимої області спектра (до ✦ ● 650 *нм*) ви-

ВІТЗ

ще, ніж на короткохвильовій. Далі можна бачити, що в середньому криві від-

биття хвойних порід розташовані нижче, ніж криві листяних порід (рис. 3.5). Таким чином, хвойні породи, володіючи в середньому меншої відбивною здатністю, виявляються більш темними, ніж листяні породи.

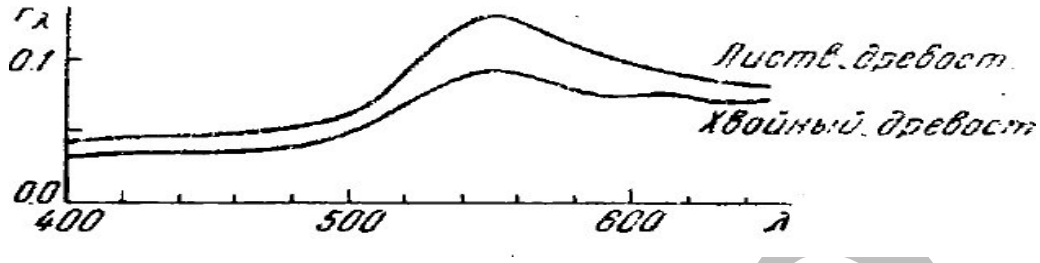


Рисунок 3.5. Середні спектральні криві відбиття лісових насаджень листяних і хвойних порід у літній період

2. Максимум відбиття у видимій області спектра у всіх насаджень, незалежно від породи й віку, розташований близько ✦ ● 550 *нм*.

3. Відбивна здатність насаджень, незалежно від породи й віку, у фазу «молодий лист» вище, чим у наступну фазу «повний лист» (рис. 3.6). Із цього випливає, що в міру розвитку молодого листя в листяних порід і голок хвої у хвойних, насадження трохи темніють. Однак хід по спектру в обох випадках залишається більш-менш однаковим. Отже, забарвлення насаджень зі зміною фази вегетації майже не міняється.

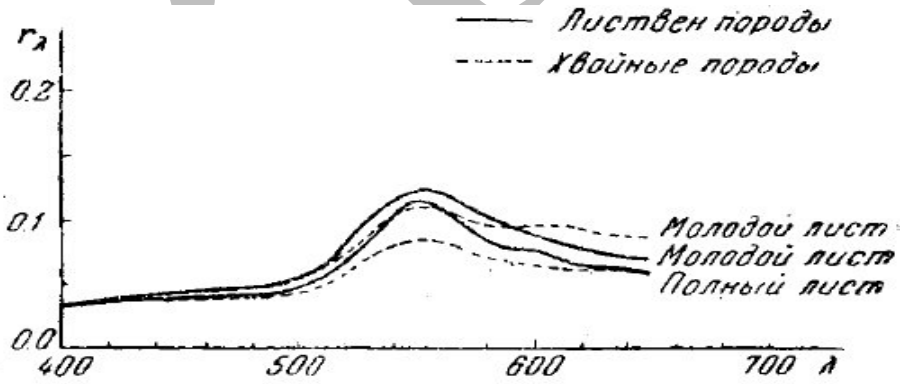


Рисунок 3.6. Спектральні криві відбиття лісових насаджень хвойних і листяних порід в фазі: «молоде листя» і «повне листя»

3.3 Основні методи перетворення вихідних спектральних ознак

До таких методів відносять метод відхилення і розрахунок індексів. *Метод відхилення* заснований на розходженні відбивальних властивостей земної поверхні у видимій і ближній ІЧ ділянках спектра. Відхилення ви-значають як функцію зональних яскравостей, що, наприклад, для знімка, отриманого системою Landsat_MSS, має вигляд:

$$K \bullet \frac{1}{4} B_4 \cdot B_5 \tilde{\cdot} \frac{1}{2} B_6 \cdot B_7 \quad 2$$

де B_4, B_5, B_5 і B_7 – рівні яскравості, відповідно, у видимій та ІЧ-ділянках (за-значено оригінальні номери спектральних каналів).

Метод можна застосовувати для виокремлення і картографування таких великих об’єктів, як водні поверхні, лісові масиви, рілля, райони забудови, а також відкритої гірської породи і ґрунтів без рослинності. Детальніша класифікація за допомогою цього методу неможлива. В одну групу можуть об’єднатися такі об’єкти, як хвойні ліси і болота. Цей простий алгоритм при-датний для швидкої попередньої класифікації.

Розрахунок індексів застосовують для створення нових зображень, використовуючи так звану алгебру зображень – математичні операції, що ком-бінують значення пікселів зональних знімків. Вони можуть бути простими, такими як різниці двох зон, або складнішими, такими, що використовують побудову функцій від значень у кількох зонах.

Такі функції виводяться на основі аналізу спектрів поглинання/відбиття досліджуваних об’єктів (кривих спектрального образу). Ці спектри відбивають найчастіше властивості об’єктів на молекулярному рівні й несуть, зокрема, інформацію про їх хімічний склад, тому індекси широко застосовують під час оцінювання і картографування стану рослинного покриву, показників біопродуктивності сільськогосподарських культур і

ВПІЗ

кормових угідь, вмісту

хлорофілу в морській воді. У багатьох випадках правильно обрані індекси можуть виявити і підкреслити розходження, які чітко не спостерігаються на вихідних зональних знімках.

Розрахунок 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 для аналізу класів об’єктів використовувати некалібровані значення яскравості на вихідному знімку (наприклад, без урахування впливу атмосферних умов знімання).

Найбільш широко похідні ознаки використовують під час аналізу рос-линного покриву. До них належать насамперед ознаки, що враховують хара-ктерні розходження спектральних яскравостей рослинних об’єктів у червоній і ближній ІЧ зонах – просте зональне відношення та вегетаційний індекс.

Вегетаційні індекси**,** їх перелік та формули визначення. Найпростіший спосіб спектрального перетворення зображень, тобто пе-

ретворення кожного пікселя зображення і присвоєння пікселю нового математичного значення із значень певного пікселя в різних діапазонах – це розрахунок вегетаційного індексу.

Вегетаційний індекс – це показник, який розраховують у результаті опе-рацій з різними спектральними діапазонами (каналами) ДЗЗ і має відношення до параметрів рослинності в певному пікселі знімка. Ефективність ВІ визначається особливостями відбиття; ці індекси виведені переважно емпірично.

Основне припущення щодо використання ВІ полягає в тому, що деякі математичні операції з різними каналами ДЗЗ можуть дати корисну інформацію про рослинність. Це підтверджується безліччю емпіричних даних.

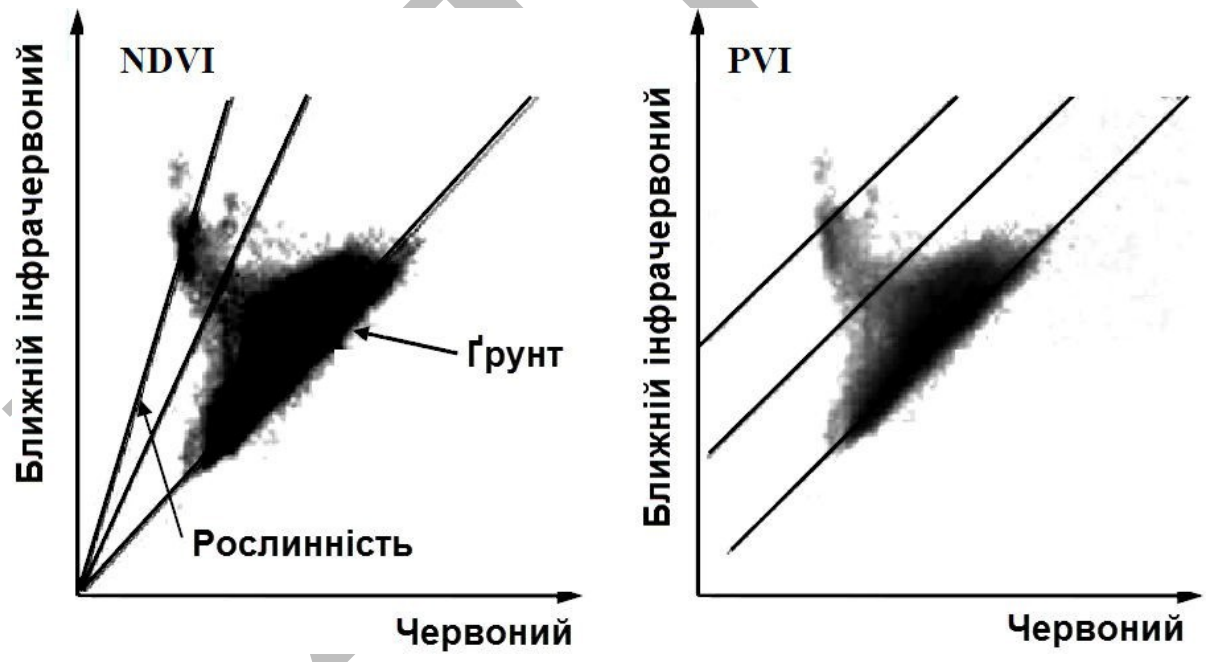
Друге припущення – це ідея, що відкритий ґрунт на знімку формуватиме в спектральному просторі пряму лінію (так звану *ґрунтову лінію*). Майже всі розповсюджені вегетаційні індекси використовують лише співвідношення

червоного/ближнього інфрачервоного каналів, припускаючи, що в ближній інфрачервоній ділянці лежить лінія відкритого ґрунту. Мається на увазі, що ця лінія означає нульову кількість рослинності.

Нині є дві різні ідеї про напрямок ліній однакової рослинності (*ізовегетаційних ліній*):

1. Усі ізовегетаційні лінії сходяться в одній точці (рис. 3.7, а). Індекси, що витримують це припущення – це *ratio-based*, відносні індекси, за якими вимірюють нахил ліній між точкою конвергенції і точки *RED-NIR* співвідношення в пікселі. Прикладами є індекси *NDVI, SAVI, RVI.*

2. Усі ізовегетаційні лінії йдуть перпендикулярно ґрунтовій лінії (рис. 3.7, б). Індекси *PVI, WDVI* і *DVI* зазвичай називають *перпендикулярними*, вони вимірюють перпендикулярну відстань від ґрунтової лінії до точки *RED-NIR* у пікселі.



а б

Рисунок 3.7. Ізолінії значень вегетаційних індексів: *NDVI* (а) і *PVI* (б)

За всієї розмаїтості вегетаційні індекси здебільшого працюють для тери-торій із розрідженим рослинним покривом дуже погано. Якщо рослинний покрив бідний, то спектр знімка переважно залежить від ґрунту. Ґрунти мо-жуть різнитися дуже сильно за відбиттям, навіть якщо для аналізу використ-

товують дуже широкі спектральні діапазони. Huete et al. (1985) і Elvidge and Lyon (1985) засвідчили, що ґрунтовий фон сильно впливає на індекси – якщо він яскравий, то значення індексу буде менше, якщо фон темний, то індекс буде більшим. Так, Elvidge and Lyon (1985) довели, що багато фонових матеріалів (ґрунт, каміння, рослинна підстилка) дуже варіюють у червоному ближньому інфрачервоному діапазоні, і це може значно змінити індекс. Для вирішення цих проблем ефективнішим методом є застосування аналізу спектральних сумішей.

Для визначених ВІ є свої пороги чутливості до розрідженості рослинно-сті (наприклад, NDVI не слід застосовувати, якщо рослинний покрив менше ніж 30%):

RVI, NDVI, IPVI – 30%;

SAVI, MSAVI1, MSAVI2 – 15%; PVI,

WDVI, GVI – 15%.

Для водних об'єктів він набуває негативних значень; для ґрунтів, сухої рослинності наближається до нуля; максимальних значень набуває для рослинності, що вегетує, і проміжних –для різних станів рослинного покриву.

NDVI підкреслює контраст оголених порід і ґрунтів із зеленою рослин-ністю, сприяє виокремленню типів і стану рослинних об'єктів. Його значення зростають із розвитком зеленої біомаси і зменшуються з її всиханням. Водночас ті самі значення вегетаційного індексу можуть відповідати екологічно різним категоріям природної і культурної рослинності [36].

Вибір вегетаційних індексів

Відбивальна здатність рослинності через поглинання хлорофілом дуже низька в червоному діапазоні і дуже висока в ближньому ІЧ через високу ро-зсіювальну здатність мезофілу Просте зональне відношення, або вегетацій-ний індекс, визначають як

$$RVI \bullet \frac{B_{NIR}}{B_{RED}},$$

ВІЗ

де B_{NIR} і B_{RED} – яскравості в ближній ІЧ і червоній зонах. Вони найбільш чутливі до наявності рослинності, характеризують розходження яскравості рослинних і нерослинних об'єктів, є індикатор зімкнутості рослинного покриву і функцією часу.

Проте, якщо за відбивальної здатності в червоному діапазоні, який дорі-внює нулю, RVI набуде невизначеності, то найчастіше використовують нормалізований вегетаційний індекс, який відповідає виразу

$$NDVI_B \bullet \frac{B_{NIR} \tilde{} B_{RED}}{B_{NIR}} \tilde{} .$$

NDVI – найбільш використовуваний індекс. NDVI простий для обчис-лення, має найширший динамічний діапазон із поширених ВІ і кращу чутли-вість до змін у рослинному покриві. Цей індекс помірно чутливий до змін ґрунтового і атмосферного фонів, крім випадків з бідною рослинністю. Для того, щоб оцінити рослинність на знімку з кількісної точки зору, NDVI за-безпечить кращі результати, якщо територія не характеризується бідною рос-линністю.

PVI є також поширеним ВІ, але дещо менше, ніж NDVI. Має вузький динамічний діапазон і меншу чутливість і дуже чутливий до зміни атмосфе-ри. Відносно простий у використанні і знаходженні ґрунтової лінії, що важ-ливо для використання інших індексів. Його краще застосовувати для тери-торій з бідною рослинністю.

SAVI використовують тоді, коли мета дослідження – розріджена ослин-ність. У цьому разі, якщо коригувальний фактор L більший ніж 0,5, доцільно використовувати вказівки статті Huete (1988). Коригувальний фактор має бути більшим ніж 0,5, якщо рослинний покрив слабо розвинений.

MSAVI також дає хороші результати, але його використовують дуже рі-дко. Багато індексів, що корегують вплив ґрунту, потребують попередньої атмосферної корекції. Якщо планується використання вегетаційних індексів для довгострокового моніторингу, потрібно дуже уважно проаналізувати ва-

ВІЗ

ріабельність ґрунтів і виконати атмосферну корекцію. Класифікацію ВІ наведено у табл. 3.2. Є деякі нюанси у змінах значень ВІ, якщо точка знімання ві-дрізняється від надира [36].

Таблиця 3.2. Класифікація вегетаційних індексів

Вегетаційний індекс	Вегетаційний індекс, що мінімізує вплив	
	ґрунту	атмосфери
RVI	SAVI	GEMI
NDVI	TSAVI	ARVI
IPVI	MSAVI	SARVI
WDVI	MSAVI2	GVI

Базові вегетаційні індекси

Під час виконання практичних досліджень за знімками створюють модифіковані *NDVI,* наприклад відомий як трансформований *NDVI* (*TNDVI*), що реалізується співвідношенням

$$TNDVI = \sqrt{\frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + B_{RED}} + 0{,}5},$$

де додавання доданка 0,5 автоматично запобігає отриманню від'ємних значень під коренем для більшості отримуваних зображень.

Відносний ВІ **(Ratio *VI, RVI)***

$$RVI = \frac{NIR}{RED}$$

Цей ВІ вперше описаний Jordan (1969). Це є найпоширеніший індекс рослинності, хоча його рідко так називають. Зазвичай, у практиці обробки даних ДЗЗ використовують відношення каналів для нівелювання різних ефектів альбедо. Відношення *NIR* до *RED* є вегетаційним компонентом знімка.

Параметри індексу:

- ізовегетаційні лінії сходяться на початку координат;
- ґрунтова лінія: нахил дорівнює 1, проходить через початок координат;

ВГЗ

- можливі значення: від 0 до ∞.

Нормалізований різницевий ВІ **(Normalized Difference *VI, NDVI)***

$$NDVI_{B_{NIR}} \bullet \frac{B_{NIR} \tilde{} B_{RED}}{B_{RED}}.$$

Вперше описаний Rouse et al. (1973), концепцію вперше представлено Kriegler et al. (1969). На практиці під ВІ найчастіше мають на увазі *NDVI.* Одна з переваг цього ВІ полягає в тому, що його значення змінюються від -1 до +1, на відміну від *RVI.*

RVI і *NDVI* функціонально рівнозначні і пов'язані один з одним наступ-ним співвідношенням:

$$NDVI \bullet \frac{RVI \tilde{} 1}{RVI . 1}.$$

Параметри індексу:

- ізовегетаційні лінії сходяться на початку координат;
- ґрунтова лінія: нахил дорівнює 1, проходить через початок координат;
- можливі значення: -1 … + 1.

Інфрачервоний ВІ **(Infrared Percentage *VI, IPVI)***

$$IPVI \bullet NIR . NIR . RED . \bullet \frac{1}{2} . NDVI . 1 . .$$

Вперше описаний Crippen (1990), який відкрив, що віднімання червоно-го компонента з чисельника не обов'язкове, що робить індекс більш швидким з погляду обчислень. Індекс може набувати значень від 0 до 1, що усуває необхідність зберігати знак, так само як усуває від'ємні значення індексу. Функціонально *IPVI* і *NDVI* еквівалентні.

Параметри індексу:

- ✓ ізовегетаційні лінії сходяться на початку координат;
- ✓ ґрунтова лінія проходить через початок координат, її нахил 1;
- ✓ можливі значення: 0 ... +1.

Різницевий ВІ **(Difference *VI, DVI)***

ВІЗ

$$DVI = NIR - RED.$$

Вперше описаний як самостійний індекс Richardson and Everitt (1992), згадується в Lillesand and Kiefer (1987).

Параметри індексу:

- перпендикулярний індекс;
- ізовегетаційна лінія може мати довільний нахил і проходить через початок координат;
- можливими є будь-які значення.

Перпендикулярний ВІ **(Perpendicular *VI, PVI)***

$$PVI = NIR - \sin\varphi \cdot \cos\varphi - RED$$

де φ – кут між ґрунтовою лінією і віссю *NIR.*

Вперше описаний Richardson and Wiegand (1977). Можна розглядати як узагальнення *DVI*з різним нахилом ґрунтової лінії. *PVI* досить чутливий до впливу атмосфери (Qi et al., 1994). Порівняння значень *PVI* для даних різних дат некоректне, якщо не було проведено їх атмосферної корекції. Параметри індексу:

- перпендикулярний індекс;
- ізовегетаційні лінії паралельні ґрунтовій лінії;
- ґрунтова лінія може мати різний нахил, проходить через початок координат;
- можливі значення: -1…+1.

Зважений різницевий ВІ **(Weighted Difference *VI, WDVI)***

$$WDVI = NIR - g - RED$$

де *g* – нахил ґрунтової лінії.

Цей ВІ вперше описаний Clevers (1988). Пов’язаний з *PVI* приблизно так само, як *IPVI* з *NDVI. WDVI* – це математично простіший варіант *PVI,* але має необмежений діапазон значень. Як і *PVI* та *WDVI,* дуже чутливий до атмосферного впливу (Qi et al., 1994).

Параметри індексу:

ВІЗ

- ✓ перпендикулярний індекс;
- ✓ ізовегетаційні лінії паралельні ґрунтовій лінії;
- ✓ ґрунтова лінія: може мати різний нахил, проходить через початок координат;
- ✓ можливі будь-які значення [36].

Індекси**,** стійкі до впливу ґрунту

Різні ґрунти мають різні спектри відбиття. Як уже зазначалося, за вегетаційних індексів має існувати ґрунтова лінія і має бути один нахил у просторі RED-NIR. Проте іноді трапляється так, що ґрунти розрізняються дуже сильно і мають різні кути нахилу на тому самому знімку. Отже, поняття про ізовегетаційні лінії {паралельні або такі, що перетинаються в точці 0) є не зовсім правильним, тому що зміни вологості ґрунту (які йдуть уздовж ізовегетаційних ліній) вноситимуть похибки у визначення величини індексу.

Проблема ґрунтового шуму найактуальніша для територій, де рослин-ність розріджена. Ця група індексів прагне зменшити ґрунтовий шум, змі-нюючи характер поводження ізовегетаційних ліній. Усі вони є відносними, і спосіб, яким вони намагаються зменшити ґрунтовий шум, це зсув точки, де є ізовегетаційні лінії.

Ці індекси зменшують ґрунтовий шум унаслідок зменшення динамічно-го діапазону індексу. Вони менш чутливі до зміни рослинного покриву, ніж NDVI, але більш чутливі, ніж PVI. (Qi et al., 1994).

Ґрунтовий ВІ **(Soil Adjusted VI, SAVI)** визначають за формулою

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \cdot (1 + L)$$

де L = [0; 1]; L = 0 для найбільшого індексу листяного покриву; L = 1 для найменшого, оптимальне значення L = 0,5; (1+ L) – множинний фактор, який є у SAVI і MSAVI та який приводить до того, що їх значення варіюють від -1 до +1. Він введений Huete (1988) для того, щоб звести ці індекси до вигляду NDVI при L, яке наближається до 0.

ВІТЗ

Цей індекс включає межі відносних і перпендикулярних індексів. Осно-вою для цього є твердження, що ізовегетаційні лінії не є паралельними і не сходяться в одній точці. Початкова побудова цього індексу ґрунтується на дослідному вимірюванні бавовни і пасовищної трави на темному і світлому ґрунтах та емпіричному уточненні фактора *L* доти, доки він не почав давати однаковий результат для різних типів ґрунтів. У результаті отримуємо відносний індекс, де точка перетину ізоліній не є точкою «0». Точка перетину має перебувати у квадранті від'ємних RED і NIR, що приводить до того, що ізовегетаційні лінії є паралельними в області додатних RED і NIR, ніж у разі RVI, NDVI і IPVI. Huete (1988) надав теоретичні основи для цього індексу, побудовані на простому випромінювальному пристрої (radiative transfer), тож, можливо, SAVI має найсильніше теоретичне обґрунтування. З іншого боку, теоретичні обчислення дають істотно інший коригувальний фактор для індексу території з рослинністю – 1 (0,5) замість емпірично знайденого – 0,75. Доведено, що коригувальний фактор може варіювати від 0 (для дуже щільних ділянок) до 1 (для дуже розріджених ділянок). Здебільшого для про-міжних щільностей рослинності використовують стандартне значення, яке дорівнює 0,5.

Параметри індексу:

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

Трансформований коригований ґрунтовий BI **(Transformed Soil Adjusted FT, *TSAVI)*** визначають за формулою

$$TSAVI = \frac{s(NIR - s \cdot RED - a)}{a \cdot NIR + RED - a \cdot s + X(1 + s^2)},$$

ВІТЗ

де *a* – координата перетину ґрунтової лінії з віссю *NIR; s* – нахил ґрунтової лінії; *X* – коефіцієнт корекції для зменшення ґрунтового шуму.

TSAVI – трансформований коригований ґрунтовий індекс рослинності, розроблений Baret et al. (1989) і Baret and Guyot (1991). Цей індекс припускає, що ґрунтова лінія може мати довільний нахил і перетин з віссю координат, та дає змогу використовувати ці величини для уточнення вегетаційного індексу. Це могло бути прийнятним способом для уникнення невизначеності у виборі фактора *L* у *SAVI*, якби не необхідність введення додаткового параметру. Параметр *X* уведений для коригування зменшення фонового ґрунтового впливу. Точка перетину ізовегетаційних ліній знаходиться між точкою 0 і точкою, що використовується в індексі *SAVI* для *L* = 0,5.

Параметри індексу:

- ❖ відносний індекс;
- ❖ ізовегетаційні лінії сходяться в квадранті від'ємних значень *RED* і *NIR;*
- ❖ ґрунтова лінія має довільний нахил і точку перетину;
- ❖ можливі значення: від - 1 до + 1.

Модифікований ґрунтовий ВІ **(Modified Soil Adjusted FT, *MSAVI)***

MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) – модифікований коригований ґрунтовий індекс, розроблений Qi et al. (1994). Його визначають за формулою

$$MSAVI \bullet \frac{NIR\tilde{}\ RED}{NIR\ RED\tilde{}\ L} \cdot 1\ L\ .$$

де $L \bullet \tilde{1}\ 2 \frown s \frown NDVI \frown WDVI$.

Коригувальний фактор *L* для індексу *MSAVI* залежить від рослинного покриву, що зумовлює замкнене коло. Потрібно враховувати стан вегетатив-ного покриву перед обчисленням індексу, який має описати рослинність.

Основна ідея *MSAVI* полягає в тому, щоб знайти змінний коригувальний фактор *L*. У цьому індексі використовують коригувальний фактор, отрима-

ний у результаті обчислення *NDVI* і *WDVI*. Це приводить до того, що ізовегетаційні лінії не сходяться в одній точці.

Параметри індексу:

- ➢ відносний індекс;
- ➢ ізовегетаційні Ліни перетинають ґрунтову лінію в різних точках;
- ➢ ґрунтова лінія може мати довільний нахил і проходить через точку 0;
- ➢ значення індексу варіює від -1 до + 1.

Модифікований ґрунтовий BI-2 (Modified Soil Adjusted VI-2, *MSAVI2*) визначають за формулою:

$$MSAVI2 = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}(1 + L),$$

де

$$L = 1 - \frac{2 \cdot NIR + 1 - \sqrt{(2 \cdot NIR + 1)^2 - 8(NIR - RED)}}{2}.$$

MSAVI2 – це другий модифікований ґрунтовий індекс, розроблений Qi et al. (1994) як рекурсивний варіант *MSAVI*.

Під час його обчислення використовують ітеративний процес: $1 = MSAVI \cdot n + 1$ підставляють замість фактора *L* у формулу підрахунку *MSAVI(n)*.

Цей процес повторюється доти, доки не буде виконано умову: *MSAVI(n - 1) = MSAVI(n)*. Обчислення WDVI і NDVI та розміщення ґрунтової лінії те-пер не потрібні.

Параметри індексу:

- ■ відносний індекс;
- ■ ізовегетаційні лінії перетинають ґрунтову лінію в різних точках;
- ■ ґрунтова лінія може мати довільний нахил і проходить через точку 0;
- ■ значення індексу варіює від - 1 до + 1 [36].

ВІЗ

Індекси, стійкі до впливу атмосфери

Стан атмосфери постійно змінюється. Повітряний прошарок поглинає певну кількість світла, що проходить крізь нього, а також розсіює його завдя-ки завислим аерозолям. Атмосфера може змінюватися дуже сильно протягом однієї сцени, особливо на території з високим рельєфом, унаслідок чого змінюється кількість світла, що потрапляє на прилади, і це може зумовлювати похибки в обчисленні індексів. Досить сильно ця проблема позначається на порівнянні результатів, отриманих у різний час. За допомогою наступних індексів можна вирішити цю проблему без застосування спеціальної атмосферної корекції. Ці індекси досягають зменшення чутливості до впливу атмосфери завдяки зменшенню динамічного діапазону. Загалом вони менш чутливі до зміни рослинного покриву, ніж NDVI. Якщо рослинність невисока, вони зазнають сильного впливу грунтового шару [36].

Індекс для глобального моніторингу навколишнього середовища

Індекс глобального моніторингу навколишнього середовища (Global Environmental Monitoring Index, GEMI) визначають за формулою:

$$GEMI = E(1 - 0{,}25E) - \frac{RED - 0{,}125}{1 - RED},$$

де

$$E = \frac{2(NIR^2 - RED^2) + 1{,}5NIR + 0{,}5RED}{NIR + RED + 0{,}5}.$$

Цей індекс глобального моніторингу навколишнього середовища розро-блено Pinty and Verstraete (1991). Автори намагалися уникнути необхідності проводити детальну атмосферну корекцію за допомогою конструювання загального набору атмосферної корекції для BI. Вони не навели докладної ар-гументації цього індексу, крім того, що дослідним шляхом установили його нечутливість до атмосферного впливу.

ВІЗ

Qi et al. (1994) засвідчив випадки явних похибок *GEMI* через ґрунтовий шум за низького рослинного покриву. Нині проводиться багато досліджень цього індексу.

Параметри індексу:

- нелінійний індекс;
- складні вегетаційні ізолінії;
- значення індексу варіює від 0 до + 1.

BI**,** стійкий до впливу атмосфери **(Atmospherically Resistant *VI,ARVI*)**, визначають за формулою:

$$ARVI \bullet \frac{NI\tilde{R} \; Rb}{NI\tilde{R} \; Rb},$$

де $Rb \bullet RED\tilde{} \; a \; RED\tilde{} \; BLUE$, як правило, a = 1, заслабкого покриття рослинності і невідомого типу атмосфери a = 0,5.

Це перший атмосферостійкий BI, введений Kaufman and Tanre (1992). Автори також запропонували провести таку саму заміну і в індексі *SAVI,* отримавши індекс *SARVI* (атмосферостійкий скоригований ґрунтовий вегета-ційний індекс, Soil adjusted Atmospherically Resistant Vegetation Index).

Qi et al. (1994) запропонував зробити цю саму заміну і в індексі *MSAVI2*, отримавши в результаті *ASVI* (Atmosphere-Soil-Vegetation Index – атмосфер-но-ґрунтовий BI). Очевидно, цю заміну можна зробити також для індексів *MSAVI* або *TSAVI.* Qi et al. (1994) довів, що цей клас індексів дещо чутливі-ший до зміни рослинного покриву, ніж *GEMI*, і менш чутливіший до ґрунто-вого та атмосферного шуму, ніж *GEM1*, якщо рослинність середня або висо-ка. Стійкість до атмосферного і ґрунтового шумів різко падає, якщо рослин-ний покрив низький.

Параметри індексу:

- відносний індекс;
- ізовегетаційні лінії поводяться як у вихідних індексах;
- ґрунтові лінії поводяться як у вихідних індексах;
- значення індексу змінюються від - 1 до + 1.

ВІЗ

Ґрунтовий ВІ**,** стійкий до впливу атмосфери **(Soil Adjusted and Atmospherically Resistant *VI, SARVI)***

Є кілька *GVI.* В їх основі лежить використання двох або більше ділянок відкритого ґрунту для побудови ґрунтової лінії, потім використовується ортогоналізація Грама-Шмідта для знаходження *«зеленої» лінії» (greenness line)*, що проходить через точку усього рослинного покриву з потужною біомасою і є перпендикуляром до ґрунтової лінії. Відстань у пікселях спектрального простору від ґрунтової лінії уздовж по «зеленій» осі і є значенням індексу *PVI* – це 2-канальна версія індексу. Kauth and Thomas (1976) розробили 4-канальний варіант індексу для MSS-знімків, Crist and Cicone (1984) створили 6-канальний варіант для TM, Jackson (1983) описав, як створити «*n*-канальну версію.

Цей індекс визначають за формулою:

$$SARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb} + L$$

ВІ зеленості **(Green *VI, GVI)***

$$GVI = -0,29 * MSS4 - 0,56 * MSS5 + 0,6 * MSS6 + 0,49 * MSS7,$$

$$GVI = -0,2848 * TM1 - 0,2435 * TM2 - 0,5436 * TM3$$
$$+ 0,7243 * TM4 + 0,0840 * TM5 - 0,1800 * TM7$$

де *MSSn* – у «*n*-каналі сенсора *MSS,* аналогічно для *TM.*

Параметри індексу:

- перпендикулярний вегетаційний індекс, що використовує «*n*-каналів;
- ізовегетаційні лінії паралельні ґрунтовій лінії;
- ґрунтова лінія може мати довільний нахил у «*n*-вимірному просторі;
- значення індексу варіюється від - 1 до + 1 [36].

ВІЗ

Ґрунтова лінія та її визначення

Ґрунтова лінія є показником, важливим для обчислення BI. Це гіпотети-чна лінія у спектральному просторі, що описує варіацію спектра відкритого ґрунту на знімку. Лінія може бути встановлена через визначення двох або бі-льше еталонів голого ґрунту на знімку, що мають різні ступені відбиття, та визначення найбільш придатної лінії у спектральному просторі. Kauth and Thomas (1976) описали знаменитий «трикутний регіон у формі шапочки з ки-тицею» (tasseled cap) у RED-NIR спектральному просторі даних MSS. Вони відкрили, що найвища точка трикутника (яка лежить на ділянці низького відбиття в червоній ділянці спектра і високого – у ближньому ІЧ) відповідає ра-йонам з пишною рослинністю, а плоска частина трикутника, що лежить на-впроти кінця трикутника, відповідає ґрунту без рослинності (рис. 3.8, 3.9).

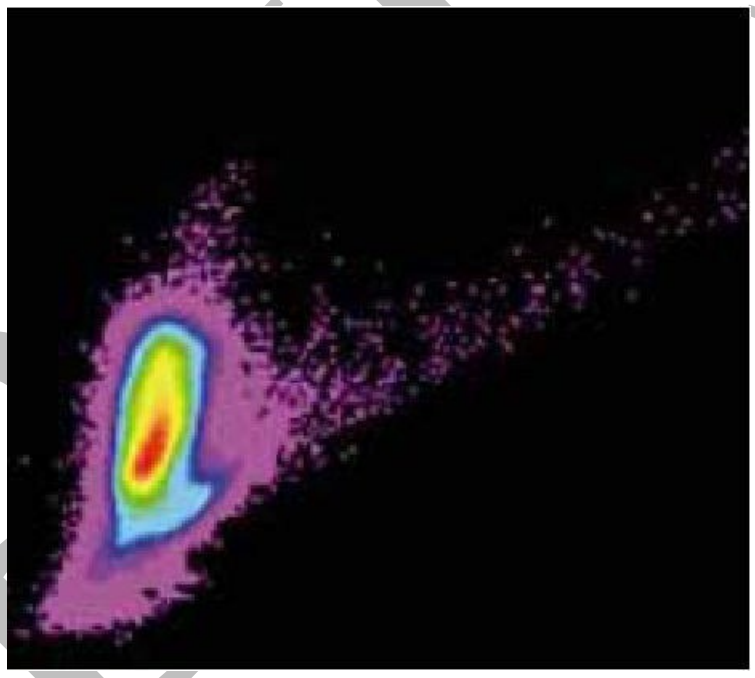


Рис. 3.8. Графік розподілу значень пікселів у червоному і ближньому ІЧ каналах Landsat

Один зі способів визначення RED-NIR ґрунтової лінії полягає у ство-ренні графіка розподілу (scatterplot) червоного та ІЧ каналів зображення. Червоному каналу призначається вісь *X*, ІЧ – вісь *Y*. У нижній правій частині графіка має бути відносно лінійна частина. Пряма лінія, яка найкраще описує

цю частину графіка, і є ґрунтовою лінією. Можна вибрати кілька точок, що описують цю межу, і визначити лінію методом найменших квадратів.

Під час роботи на території з пишною рослинністю ґрунтова лінія на графіку часто є нечітко вираженою. Це унеможливлює використання перпендикулярних індексів або індексів типу *TSAVI* і *MSAVI1*. У цьому разі ефекти-вним буде використання *NDVI,* оскільки він найкраще працює на ділянках з буйною рослинністю. Коригувальний фактор *L* для *SAVI* у цій ситуації буде близький до 0, тому *SAVI* наближатиметься до *NDVI*. У цьому разі також можна використовувати *MSAVI2*.

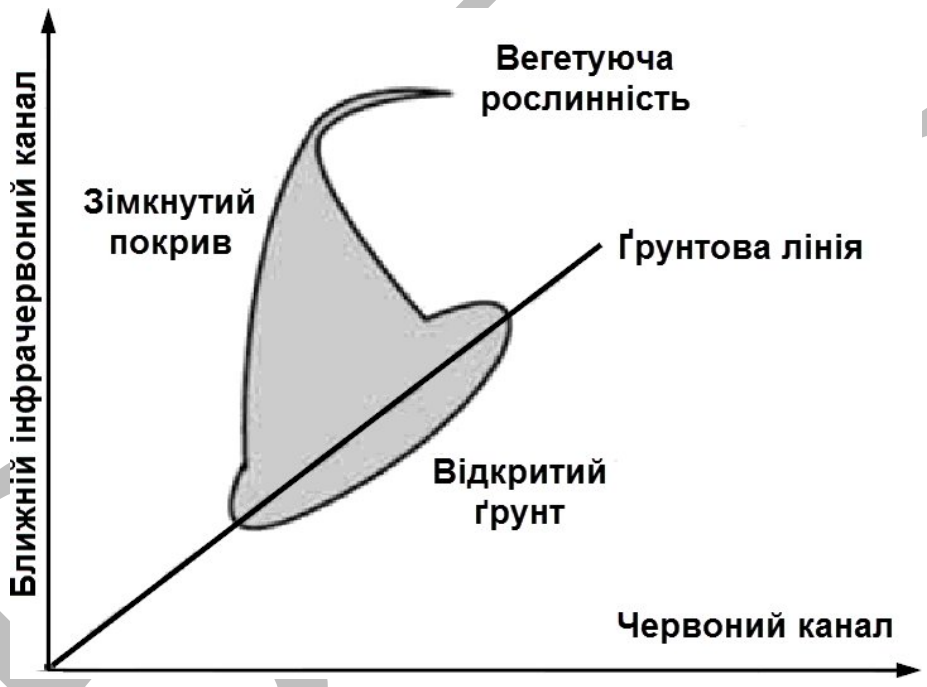


Рисунок 3.9. Типовий розподіл значень відбиття для сільськогосподарських культур у червоному і ближньому ІЧ каналах

Специфічні відношення зональних значень знімків, отриманих системою Landsat TM, використовують також і у геологічних дослідженнях. Напри-клад, відношення *B5/B4* дає змогу ідентифікувати сполуки оксиду феруму (II), *B3/B1*– оксиду феруму (III). Синтезування зображень, отриманих за до-

помогою цих відношень, дає змогу ідентифікувати суміші мінералів, а відношень *B5/B7, B3/B1, B4/B3* – поклади гідротермального походження [36].

Вегетаційні індекси відбиття

Аналіз предметно-специфічних особливостей формування спектрально-го розподілу інтенсивності відбитого від рослинного покриву світла в діапа-зоні 400-2500 нм і впливу на нього низки внутрішніх і зовнішніх факторів довів, що характеристики спектрів відбиття можуть розглядатися як інфор-мативна основа під час розроблення алгоритмів визначення листкового інде-ксу, величини проективного покриття ґрунту рослинністю, біомаси, вмісту хлорофілу та води в листі, частки фотосинтетично активної радіації, погли-нутої рослинністю, та інших параметрів, важливих для характеристики її стану Розроблення функціональних залежностей між характеристиками рослин і даними дистанційних спектральних вимірювань є ключовим моментом досліджень, спрямованих на розроблення методів дистанційної діагностики стану рослин. Основна проблема при цьому полягає у відшуканні таких інформативних показників, які б забезпечували потрібну точність визначення на їх основі фотометричних і фізіологічних характеристик рослин. Критерієм відбору показників є висока чутливість до рослинного параметра та незалеж-ність від факторів, які руйнують взаємозв’язок між спектральним параметром і характеристикою рослинності.

Оскільки основними зовнішніми факторами, що впливають на величину відбиття від системи ґрунт/рослинність, є характеристики ґрунту та умови освітлення, основні зусилля спрямовані на застосування методів, які б змен-шували їхній вплив. З цією метою для збільшення контрастності між рослинністю і ґрунтом під час представлення даних дистанційних вимірювань відбиття використовують низку вегетаційних індексів. У їх основу покладено відмінності між відбиттям від ґрунту і рослинності в ближній інфрачервоній та червоній або зеленій ділянках спектра.

ВІТЗ

Для зменшення впливу умов освітлення та ґрунтової підстилки використовують вегетаційні індекси, які визначають як просте відношення коефіцієнтів відбиття в інфрачервоній *IR* та зеленій *G* ділянках спектра

$$RVI = \frac{IR}{G}$$

та вегетаційний індекс нормалізованої різниці *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index)

$$NDVI = \frac{IR - GR}{IR + GR},$$

де *IR* і *GR* – коефіцієнти відбиття відповідно в інфрачервоній і зеленій ділянках.

Замість *GR* використовують також значення відбиття в червоній ділянці *R* .Каут і Томас запропонували чотири індекси, які є лінійними комбінаціями відбиття в чотирьох смугах мультиспектрального сканера MSS супутника Landsat. Вони дістали назви *яскравість BR, зеленість GN, жовтизна YE* та *nonsuch NS* (нерівномірність). Паралельно Річардсон і Віганд використали дві смуги: ІЧ і червону, щоб розробити двовимірний перпендикулярний вегетаційний індекс

$$PVI = IR - IR_{soil} - {}^2GR - GR_{soil},$$

де *IR*, *GR*, IR_{soil}, GR_{soil} – коефіцієнти відбиття від системи ґрунт/рослинність і ґрунту (з індексом soil), відповідно, в інфрачервоній і зеленій ділянках.

Індекс ґрунтової лінії *SLI* разом з перпендикулярним *PVI* є окремими випадками класу спектральних індексів лінійних комбінацій *n*-спектральних смуг у *n*-вимірному просторі. Цей клас індексів застосовують для відмежування рослинності від ґрунтової підстилки. Отримання двовимірних перпендикулярних індексів полягає у знаходженні перпендикулярної (ортогональної) відстані від лінії, що представляє ґрунт, до точки, яка відповідає рослинності. В міру того, як збільшується *n*, складність обчислень зростає. *N*-просторову концепцію складно візуалізувати, якщо $n > 3$. У разі двовимірних

ВІТ

індексів їх можна подати графічно. На графіку залежності між відбиттям у червоній та ІЧ ділянках значення відбиття для ґрунту, отримані мультиспектральним сканером, утворюють пряму лінію. В міру росту і розвитку рослинності відбиття в червоній ділянці зменшується, а в ближній ІЧ – збільшуєть-ся. Точки рослинності лежать поза лінією ґрунту – перпендикулярно до лінії ґрунту (рис. 3.10).

Величина відстані від точки, що відповідає рослинності, до лінії ґрунту виражає кількість наявної рослинності. Точки *A* і *B* – це, відповідно, сухий і мокрий ґрунти, *C* і *D* – точки, що відповідають однаковій кількості рослинності *(PVI C = PVI D*) з неповним проективним покриттям, відповідно0 сухо-го і мокрого ґрунтів. Точка *E* відповідає рослинності з повним проективним покриттям ґрунту і істотно не залежить від зміни ґрунтової підстилки. Відстань від точки *F* до перетину лінії ґрунту з перпендикулярами, опущеними на неї з точок *C, D* і *E*, називають *індексом ґрунтової лінії.*

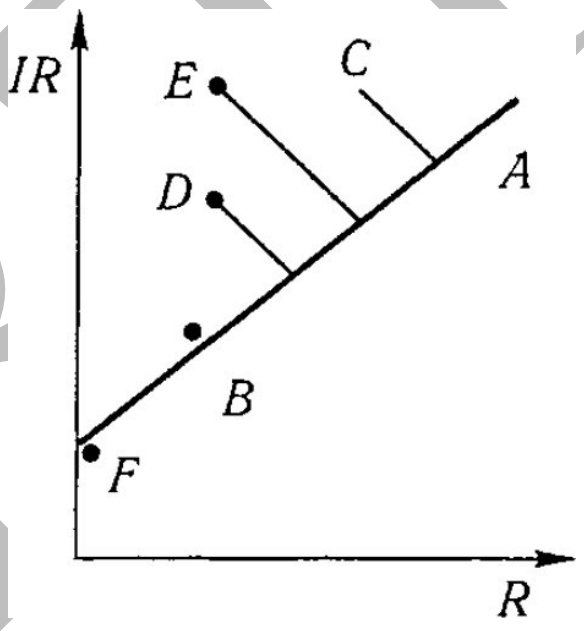


Рисунок 3.10. Діаграма лінії ґрунту і точок рослинності у двовимірному просторі

Оскільки перетворення Каута-Томаса потребують значного обсягу обчи-слень і громіздких польових вимірювань, перевагу віддають найпростішому

із обчисленні індексу *NDVI.* Цей індекс не залежить від умов освітлення, проте він чутливий до оптичних властивостей ґрунту у разі незімкнених по-сівів.

Під час розрахунку індексу зваженої різниці *WDVI* (Weighted Difference Vegetation Index) введено корекцію ІЧ відбиття від системи ґрунт/рослинність на вплив на нього відбиття від ґрунту

$$WDVI = r_{IR} - C r_R,$$

де C – відношення коефіцієнтів відбиття від ґрунту в ІЧ та червоній ділянках ($C = r_{IR} / r_R$). Для послаблення впливу яскравості на червоне та ІЧ відбиття використовують ВІ *SAVI* (Soil Adjusted Vegetation Index):

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}(1 + L),$$

де *NIR* і *RED* – коефіцієнти відбиття відповідно в ближній ІЧ і а червоній ділянках спектра; L – поправочний коефіцієнт.

При $L = 0$ *SAVI* є ідентичним NDVI. Встановлено, що значення L змен-шується зі збільшенням густоти рослинного покриву. За дуже малих значень проективного покриття $L = 1$.

За нормальної густоти виробничих посівів $L = 0{,}5$. У разі загущених по-сівів $L = 0{,}25$. Значення для L були уточнені, зокрема, для кукурудзи вони становлять, листковий індекс (ЛІ):

ЛІ < 1 $L = 0{,}6$;

1 < ЛІ < 2,5 $L = 0{,}4$;

ЛІ > 2,5 $L = 0{,}15$.

Для оптимізації поправочного коефіцієнта . потрібно знати значення листкового індексу перед обчисленням *SAVI.*

Для оцінки низького значення листкового індексу використовують *TSAVI:*

$$TSAVI = \frac{c(NIR - c \cdot RED - d)}{c \cdot NIR + RED - c \cdot d + 0{,}08(1 + c^2)}.$$

ВІЗ

Визначення *TSAVI* потребує знання параметрів лінії ґрунту *c* і *d* (нахил і перетин, відповідно *y = cx +d).* При *c* = 1 і *d* = 0 *TSAVI буде* еквівалентним *NDVI.* У разі, якщо ґрунт не покритий рослинністю, *TSAVI* має дорівнювати нулю.

Ґрунтова лінія разом із точкою найбільшої величини фітомаси або лисо-вого індексу утворює трикутник. Всередині нього паралельно ґрунтовій лінії розміщуються лінії ізовегетації, вздовж яких проективне покриття рослинністю (або індекс листяної поверхні) однакове. Зміни вздовж ізолінії зумовлю-ються переходом від темних і вологих до світлих і сухих ґрунтів.

Оскільки зі збільшенням проективного покриття (тобто в міру віддален-ня від ґрунтової лінії) внесок ґрунтової компоненти у величину сумарного сигналу, який приймається сенсором, зменшується, то відповідно звужується діапазон варіацій за ґрунтовою координатою й утворюється трикутник.

Спосіб обчислення перпендикулярних індексів ґрунтується на визначені ортогональної відстані від ґрунтової лінії до ізолінії рослинності, тоді як індекси відношення визначають нахил лінії, що з'єднує точку перетину всіх ізоліній цього індексу. У разі *NDVI* – це початок координат. Під час розгляду одночасно перпендикулярного індексу та індексу відношення виявляється протиріччя в описі спектральної поведінки системи ґрунт/ рослинність.

Крім негативного впливу ґрунту на спектральні характеристики системи ґрунт/рослинність певне значення має вплив змін атмосферних параметрів.

Для врахування впливу варіацій атмосфери використовують індекс *ARVI* (Atmospherically Resistant Vegetation Index). Його обчислення передбачає використання спектрального каналу в синій ділянці. У працях Х'юїта зазначено, що на величину ґрунтових ліній впливає невизначеність параметрів атмосфери, а індекси, що знижують вплив атмосфери, чутливі до ґрунтового

«шуму» [36].

ВІТЗ

4. Оцінювання стану рослинності з використанням багатоспектральних космічних даних дистанційного зондування Землі

4.1 Дослідження рослинності на основі вегетаційних індексів

На сьогодні відомо близько 160 різних ВІ. Вони підбираються експериментально (емпіричним шляхом), виходячи з відомих особливостей кривих спектральної відбивної здатності рослинності і ґрунтів.

Для оцінки кількості рослинності за багатоспектральними КЗ зазвичай використовуються різноманітні ВІ: NDVI, WDVI (weighted difference vegetation index), PVI (perpendicular vegetation index) та їх похідні, більш змістовно пов’язані з фітометричними та біопродуктивними показниками – GPP (gross primary productivity), NPP (net primary productivity), FPAR (fraction of photosynthetically active radiation), LAI.

Розрахунок більшої частини ВІ базується на двох найбільш стабільних (не залежних від інших факторів) ділянках спектральної кривої рослинності. На червону зону спектру (0,62-0,75 мкм) припадає максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом, а на ближню ІЧ зону (0,75-1,3 мкм) – максимальне відображення енергії клітинною структурою листя. Тобто, висока фотосинтетична активність (пов'язана, як правило, з великою фітомасою рослинності) веде до більш низьких значень коефіцієнтів відбиття в червоній зоні спектру і великим значенням в ближній ІЧ. Відношення цих показників один до одного дозволяє чітко відокремлювати рослинність від інших природних об’єктів.

Також береться до уваги зона червоного краю в спектральному діапазоні 0,66-0,78 мкм, де для рослин характерне відчутне збільшення значень коефі-цієнтів відбиття у напрямку збільшення довжини хвилі, а різка швидкість їх-нього збільшення залежить від видового складу рослинного покриву. Довжи-на хвилі, на якій швидкість зміни спектру відбиття максимальна, називається позицією червоного краю – Red Edge Position і належить до множини вегета-

ВІЗ

ційних індексів червоного краю, які, зазвичай, визначаються за гіперспектральними даними. За даними досліджень Red Edge Position є індикатором стану рослинності, а його зсуви є наслідком стресових умов росту рослин.

На підставі поняття червоного краю побудований найбільш популярний і часто використовуваний вегетаційний індекс – NDVI. Його значення визначаються спектральним діапазоном в інтервалі поглинання сонячного випромінювання хлорофілом і побічно розглядаються як величини, що відобража-ють розподіл запасу надземної фотосинтетично-активної фітомаси, корелю-ють з індексом листкової поверхні і проективним вмістом хлорофілу в асимі-люючих органах на одиницю площі поверхні (хлорофільний індекс). Остання величина може бути застосована для кількісної оцінки стоку фотосинтетич-ного зв'язування вуглецю рослинними угрупованнями.

Якість рослинності за багатоспектральними КЗ оцінюється, в основному, за вмістом важливих для життєдіяльності пігментів, перш за все – хлорофілу, а також каротиноїдів, антоціанів і флавоноїдів. Дистанційна оцінка вмісту пігментів базується на аналізі спектральних характеристик відбиття живого листя рослин у видимому та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах, причому достовірність цього оцінювання залежить від точності відновлення спектральної кривої відбиття рослинності та її похідних; вологовміст рослинності, який визначається температурою та відбиттям рослинного покриву в середньому інфрачервоному діапазоні; узагальненні показники здо-ров'я рослинності – фотосинтетична активність та стрес, які досліджуються, як правило, за допомогою спеціальних ВІ – SIPI (structural independent pigment index), PSRI (plant senescence reflectance index), DSWI (disease water stress index) та багатьох інших, або спеціалізованих ортогональних перетво-рень, таких як КТТСТ (Kauth-Thomas tasseled cap transformation).

У даній дипломній роботі для оцінювання стану рослинності частини території Полтавської області використовуватиметься ВІ NDVI.

На рис. 4.1 показана карта сільськогосподарських земель Полтавської області.

ВІТЗ

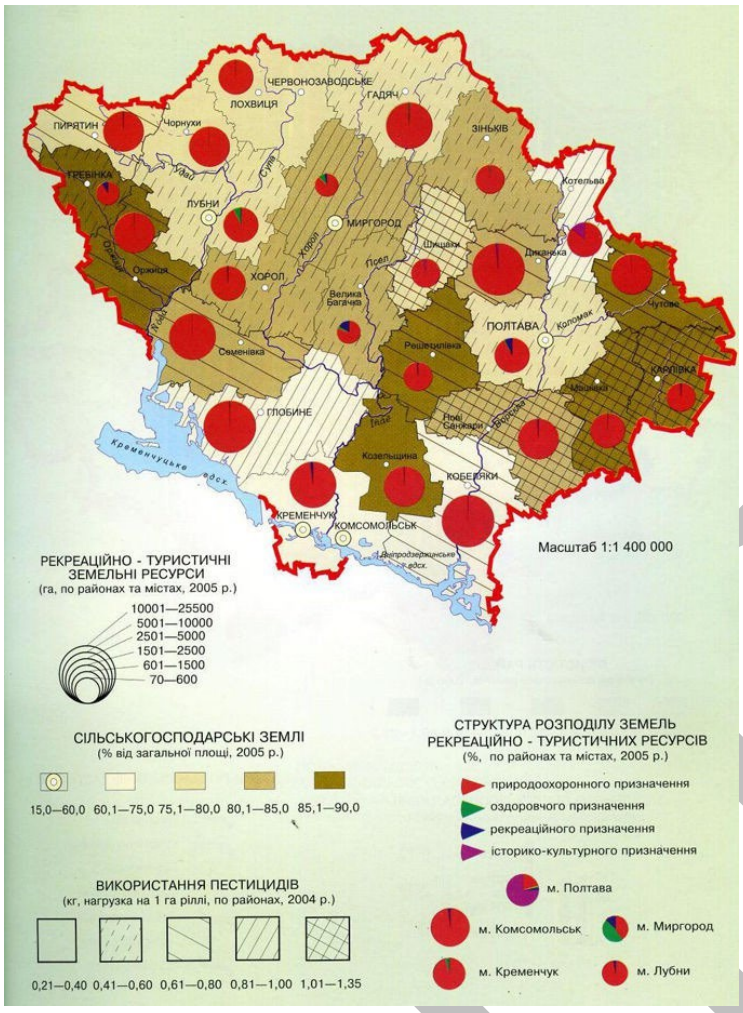


Рисунок 4.1. Карта сільськогосподарських земель Полтавської області

4.2 Отримання та інтерпретація космічних знімків системи Landsat

Метою даної дипломної роботи є оцінка стану рослинності Полтавської області за матеріалами ДЗЗ. В якості таких матеріалів використовуватимемо КЗ американської системи Landsat (з англ. Landsat – Land Remout Seneing Satellite – супутник ДЗЗ). Дані зі ШСЗ Landsat на бажану територію можна завантажити після попередньої реєстрації на сайті Геологічної служби США (англ. United States Geological Survey, скорочено **USGS**) ***http://earthexplorer.usgs.gov/*** у вигляді архіву, що містить набір 16-бітних растрових файлів формату GeoTIFF у вищезгаданих спектральних діапазонах.

ВІЗ

Також є текстовий файл з метаданими і зображення для оцінювання якості (початковий формат *tar.gz).

У даній роботі використовуватимемо КЗ системи Landsat 8 зі значенням хмарності не більше 30% (рис. 4.2).

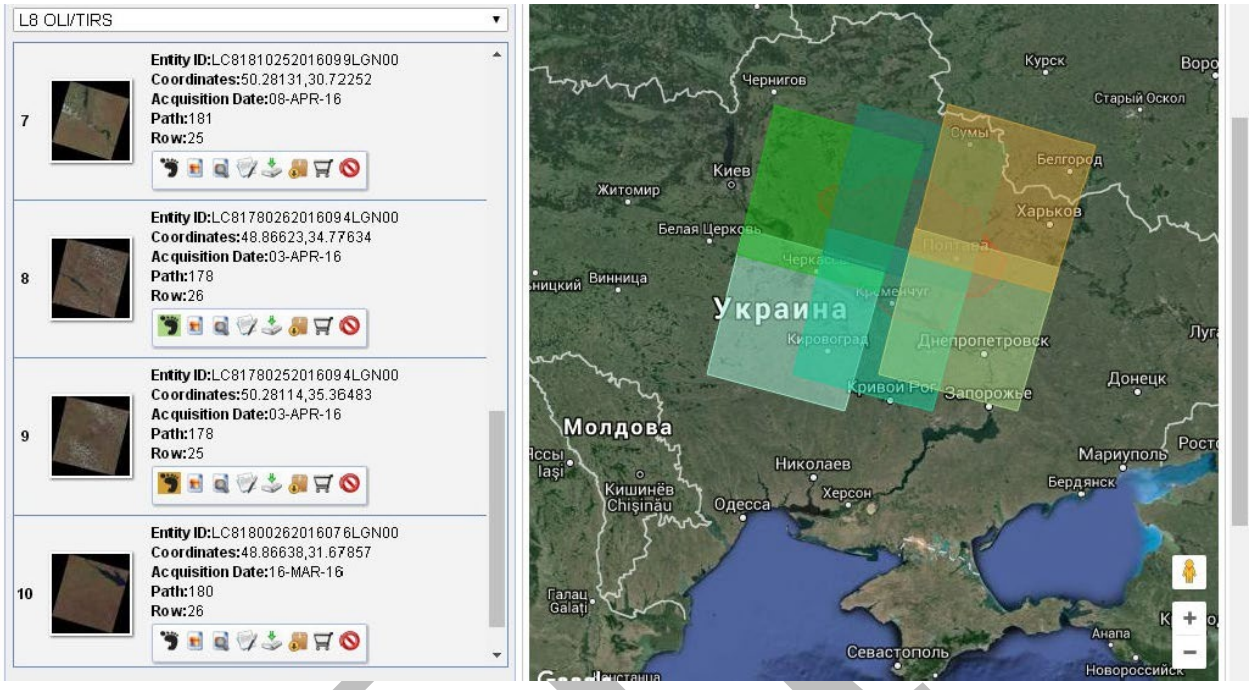


Рисунок 4.2. Отримання знімків Landsat 8 з сайту Геологічної служби США

Оцінка стану рослинності проводилася на основі двох КЗ OLI LANDSAT 8, які покривають південно-західну частину Полтавської області з найбільшим відсотком сільськогосподарських земель (рис. 3.1). Один КЗ отримано у липні 2015 р., а інший – у квітні 2016 р. Знімки покривають одну й ту саму частину Полтавської області з наступними координатами кутів КЗ:

CORNER_UL_LAT_PRODUCT = 49.93750,

CORNER_UL_LON_PRODUCT = 33.19370,

CORNER_UR_LAT_PRODUCT = 49.88678,

CORNER_UR_LON_PRODUCT = 36.43460,

CORNER_LL_LAT_PRODUCT = 47.81090,

CORNER_LL_LON_PRODUCT = 33.18566,

CORNER_LR_LAT_PRODUCT = 47.76381,

CORNER_LR_LON_PRODUCT = 36.29234,

ВЛА

де LAT (latitude) – широта, LON (longitude) – довгота.

Параметри проекції є наступними: MAP_PROJECTION = "UTM", DATUM = "WGS84", ELLIPSOID = "WGS84", UTM_ZONE = 36.

Програма ШСЗ Landsat має вже більш ніж сорокарічну історію. Почат-кова назва місії була ERTS (Earth Resources Tehcnology Satellite). Перший ШСЗ Landsat 1 було запущено ще в липні 1972 році. Після цього протягом 1975-1984 рр. були виведені на орбіту й успішно функціонували супутники Landsat 2 (3,4,5), які наразі вже не використовуються. Супутник Landsat 6, який був запущений 05.10.1993, вивести на орбіту не вдалося. Наступний за ним Landsat 7 було запущено у 1999 р. і він продовжує функціонувати по сьогоднішній день. Landsat 8 є вже сьомим із успішно виведених на орбіту супутників. Його запуск відбувся 11 лютого 2013 р. за допомогою ракети-носія Атлас-5 401 з авіабази Ванденберг у США. Перші знімки було отрима-но у березні 2013 р., а на сьогодні відзнято майже всю територію планети. Основним завданням нового ШСЗ є одержання знімків середньої просторової роздільної здатності протягом не менше п’яти років. Дані, зібрані за допомо-гою Landsat 8, розповсюджуються безкоштовно через геопортали GloVis, EarthExplorer та LandsatLook Viewer. *Знімки геокодовані та ортотрансфор-мовані*. Фактично йдеться про готовий актуальний продукт картографічного виробництва, який можна використовувати для потреб тематичного і топо-графічного картографування місцевості, оцінювання нафтогазоносності тери-торії, пошуку корисних копалин, прогнозування врожайності, моніторингу стану лісів та інших природних об’єктів і для вирішення багатьох інших нау-кових і прикладних задач.

Питання дослідження геометричної точності знімків з попереднього супутника Landsat 7 висвітлено досить широко в зарубіжних публікаціях. Аналіз цих праць свідчить про те, що геометрична точність ортознімків з Landsat 7 у середньому становить 23-30 м. Це відповідає 1,5-2-м пікселям на місцевості в панхроматичному каналі сенсора.

ВІТЗ

Основні характеристики ШСЗ серії Landsat відрізняються моделями бортових скануючих пристроїв MSS і TM: LANDSAT MSS – зйомка в 4-х зо-нах спектру (зелена 500-600 нм; червона 600-700 нм і дві ближні ІЧ: 700-800 і 800-1100 нм). Просторова розрізненність біля 80 м, радіометрична розрізнен-ність – 6 біт (64 градації яскравості у кожній зоні); LANDSAT TM – зйомка в 7 зонах (синя 450-520 нм, зелена 520-600 нм, червона 630-690 нм, ближня ІЧ 760-900 нм, середня ІЧ 1550-1740 нм, дальня – теплова ІЧ 8 000-15 000 нм, мікрохвильова 2080-2350 нм). У всіх діапазонах, просторова розрізненність 30 м, окрім далекої ІЧ (120 м). Радіометрична розрізненність 8 біт (256 гра-дацій у кожній зоні). Площа, що охоплюється повним кадром LANDSAT (як TM, так і MSS) – 185х170 км (31 450 км^2).

Landsat 8, знімки якого використовуватимуться у даній роботі, був ви-ведений на орбіту 11 лютого 2013 р. Це є восьмий ШСЗ у рамках програми Landsat і сьомий, виведений на орбіту. Початковою його назвою була Landsat Data Continuity Mission (LDCM). Landsat 8 створений спільно NASA і USGS. Супутник побудований на базі платформи LEOStar-3 компанією Orbital Sciences Corporation. Корисне навантаження космічного апарата створене Ball Aerospace і Goddard Space Flight Center (NASA), запуск здійснений United Launch Alliance.

Приблизно 100 днів послу виведення LDCM проходив налаштування і перевірку і знаходився під керуванням NASA. 30 травня 2013 р., після завершення перевірок LDCM був переданий під керування USGS і отримав офі-ційне позначення Landsat 8.

Landsat 8 одержує зображення у видимому діапазоні хвиль, у близько-му ІЧ і в далекому ІЧ, із розрізненністю КЗ від 15 до 100 м на точку. Викону-ється знімання суші й полярних регіонів. За добу знімається порядку 400 сцен (у попереднього Landsat-7 було всього 250 сцен за день). Сенсори OLI і TIRS мають більш високе відношення сигнал-шум (SNR) і дозволяють зніма-ти до 12 біт на точку.

ВІТЗ

Супутник Landsat 8 продовжує одержання даних для програми Landsat, використовуючи два набори інструментів: ***Operational Land Imager (OLI)*** і ***Thermal InfraRed Sensor (TIRS)***. Перший набір отримує зображення в 9-ти діапазонах видимої частини спектра й близької ІЧ, другий сенсор – в 2-х діапазонах дальнього (теплового) ІЧ діапазону. Супутник розрахований на строк активного існування в 5,25 років, однак запас палива дозволяє використовувати його до 10 років.

Основні наукові завдання Landsat 8:

- збір і збереження багатоспектральних зображень середньої розрізненності (30 м на точку) протягом не менш ніж 5 років;
- збереження геометрії, калібрування, покриття, спектральних характеристик, якості зображень і доступності даних на рівні, аналогічному попереднім супутникам програми Landsat;
- безкоштовне поширення зображень, отриманих за допомогою Landsat 8.

Рівні обробки даних супутника Landsat [36]

Залежно від використовуваного сенсора, ДДЗ піддаються різним видам корекції.

*Рівень **0Rp*** для ETM+ (некоректовані ряди), за якого дані не піддаються радіометричній і геометричній корекціям.

*Рівень **1G*** для ETM+, TM і MSS (систематична корекція) містить радіометричну і геометричну корекції. У цьому разі дані зводяться в проекцію, необхідну замовнику.

*Рівень **1G_SLC-off*** для ETM+ (систематична корекція) із заповненням пропущених областей (для знімків, отриманих в SLC-off-режимі), включаючи також радіометричну і геометричну корекції.

*Рівень **1P*** для ETM+, TM і MSS (точна корекція) містить радіометрич-ну і геометричну корекції з використанням GCP-точок (наземні опорні точ-ки).

ВЦЗ

*Рівень **1T*** для ETM+, TM і MSS («земна корекція») включає радіомет-ричну і геометричну корекції з використанням цифрових моделей рельєфу.
Телескоп OLI складається з 4-х нерухомих дзеркал. Спектральні канали сенсору OLI Landsat 8 наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Спектральні канали сенсора **OLI** ШСЗ **Landsat 8**

Спектральний канал	Довжини хвиль	Розмір пікселя на місцевості
Канал 1 – блакитний; узбережжя та аерозолі (Coastal / Aerosol, New Deep Blue)	0,433-0,453 мкм	30 м
Канал 2 – синій (Blue)	0,450-0,515 мкм	30 м
Канал 3 – зелений (Green)	0,525-0,600 мкм	30 м
Канал 4 – червоний (Red)	0,630-0,680 мкм	30 м
Канал 5 – ближній ІЧ (Near Infrared, NIR)	0,845-0,885 мкм	30 м
Канал 6 – середній ІЧ (Short Wavelength Infrared, SWIR 2)	1,560-1,660 мкм	30 м
Канал 7 – середній ІЧ (Short Wavelength Infrared, SWIR 3)	2,100-2,300 мкм	30 м
Канал 8 – панхроматичний (Panchromatic, PAN)	0,500-0,680 мкм	15 м
Канал 9 – пір'ясті хмари (Cirrus, SWIR), середній ІЧ	1,360-1,390 мкм	30 м

Параметри продукції Landsat 8:

- рівень обробки: 1T (корекція рельєфу);
- формат зображень: GeoTIFF;
- розмір пікселя: 15 м/30 м/100 м (панхроматичний канал/ мультиспектральний канал/ дальній ІЧ);
- проекція: UTM (Universal Transverse Mercator – універсальна поперечна проекція Меркатора), а також полярна стереографічна для Антарктиди;
- система координат: WGS 84.

ІЧ телескоп TIRS використовує 4-ри лінзи, виготовлені з германія і селеніду цинку. Телескоп охолоджується до 185 К за рахунок випромінювання тепла зі спеціального радіатора. Спектральні канали сенсору TIRS Landsat 8 наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Спектральні канали сенсора **TIRS** ШСЗ **Landsat 8**

Спектральний канал	Довжини хвиль	Розмір пікселя на місцевості
Канал 10 – дальній ІЧ (Long Wavelength Infrared, TIR1)	10,30-11,30 мкм	100 м
Канал 11 – дальній ІЧ (Long Wavelength Infrared, TIR2)	11,50-12,50 мкм	100 м

Інтерпретація комбінацій каналів ДДЗ Landsat TM / ETM+ наведена в таблиці 4.3 [13, 36].

ВІТЗ

Таблиця 4.3

Інтерпретація комбінацій каналів ДДЗ **Landsat TM / ETM+**

Комбінація каналів **Landsat 5,7**	Комбінація каналів **Landsat 8**	Імовірна інформація, яку можна отримати за знімками
4-3-2	5-4-3	Стандартна комбінація «штучні кольори». Рослинність відображується у відтінках червоного, міська забудова – в зелено-блакитних, а колір ґрунту варіюється від тем-но- до світло-коричневого. Лід, сніг і хмари виглядають білими або світло-блакитними. Хвойні ліси виглядатимуть темно-червоними або навіть коричневими, порівняно з листяними. Ця комбінація дуже популярна, її використовують переважно для вивчення стану рослинного покриву, моніторингу дренажу і ґрунтової мозаїки, а також для вивчення сільськогосподарських культур. Загалом насичені відтінки червоного є індикаторами здо-рової та (або) широколистяної рослинності, тоді як світ-ліші відтінки характеризують трав'янисту або рідколіс-ся/чагарникову рослинність.
3-2-1	4-3-2	Комбінація «природні кольори». У цій комбінації використовують канали видимого діапазону, тому об'єкти земної поверхні виглядають так, як вони сприймаються людським оком. Здорова рослинність виглядає зеленою, поля після збирання врожаю – світлими, нездорова рослинність – коричневою і жовтою, дороги – сірими, берегові лінії – білястими. Ця комбінація каналів дає можливість аналізувати стан водних об'єктів і процеси седи-ментації, оцінювати глибини, її також використовують для вивчення антропогенних об'єктів. Вирубки і розріджена рослинність визначаються погано, на відміну від комбінації 4-5-1 або 4-3-2. Хмари і сніг виглядають од-наково білими і важко помітні. Крім того, складно відо-кремити один тип рослинності від іншого. Ця комбіна-ція не дає змоги відрізнити мілководдя від ґрунтів, на відміну від комбінації 7-5-3.

ВПО

Продовження таблиці 4.3

7-4-2	7-5-3	Ця комбінація дає зображення, наближене до природних кольорів, але водночас дає змогу аналізувати стан атмосфери і дим. Здорова рослинність виглядає яскраво-зеленою, трав'янисті угруповання – зеленими, яскраво-рожеві ділянки детектують відкритий ґрунт, коричневі й жовтогарячі тони характерні для розрідженої рослинності. Сухостійна рослинність виглядає помаранчевою, вода – блакитною. Пісок, ґрунт і мінерали можуть мати велику кількість кольорів і відтінків. Ця комбінація дає добрий результат під час аналізу пустель і спустошених територій. Крім того, може бути використана для вивчення сільськогосподарських земель і водно-болотних угідь. Території після пожежі виглядатимуть яскраво-червоними. Цю комбінацію використовують для вивчення динаміки пожеж і постпожежного аналізу території. Міська забудова відображується у відтінках рожево-фіолетового, трав'янисті угруповання – зеленими і світло-зеленими. Світло-зелені точки у межах мі-ських територій можуть бути парками, садами тощо. Маслино- во-зелений колір характерний для лісових масивів, темніший колір є індикатором домішок хвойних порід.
4-5-1	5-6-2	Здорова рослинність відображується у відтінках червоного, коричневого, жовтогарячого та зеленого. Ґрунти можуть вигляда-ти зеленими або коричневими, урбанізовані території – білува-тими, сірими і зелено-блакитними. Яскраво-блакитний колір може вказувати на нещодавно вирубані території, а червонува-ті – відновлення рослинності або розріджену рослинність. Чис-та, глибока вода виглядатиме насичено темно-синьою (майже чорною), якщо це мілководдя або у воді міститься велика кількість суспензій, то в кольорі переважатимуть світліші сині відтінки. Додавання середнього інфрачервоного каналу дає змогу домогтися чіткого розрізнення віку рослинності. Здорова рослинність дає дуже сильне відбиття в 4 і 5 каналах. Використан-ня комбінації 3-2-1 паралельно з цією комбінацією дає можли-вість розрізняти затоплювані території і рослинність. Ця комбі- нація малопридатна для детектування доріг і шосе.

ВПІ

Продовження таблиці 4.3

4-5-3	5-6-4	Ця комбінація ближнього, середнього ІЧ-каналів і червоного видимого каналу дає змогу чітко розрізнити межу між водою і сушею та підкреслити приховані деталі, які погано видно під час використання лише каналів видимого діапазону. З великою точністю детектуватимуться водні об'єкти суші. Ця комбінація відображує рослинність у різних відтінках і тонах коричневого, зеленого і жовтогарячого. За її допомогою можна здійснити аналіз вологості, вона є ко-рисною також під час вивчення ґрунтів і рослинного покриву. Загалом, що вища вологість ґрунтів, то темнішою вона виглядатиме, що зумовлено поглинанням водою випромінювання ІЧ-діапазону.
7-5-3	7-6-4	Ця комбінація дає зображення, близьке до природних кольорів і водночас дає змогу аналізувати стан атмосфери і дим. Рослинність відображується у відтінках темно- й світло-зеленого, урбанізовані території виглядають білими, зелено-блакитними і малиновими, ґрунт, пісок і мінерали можуть набувати найрізноманітніших кольорів. Практично повне поглинання випромінювання в середньому ІЧ-діапазоні водою, снігом і льодом дає можливість чітко виділяти бе-регову лінію і підкреслити водні об'єкти на знімку. «Гарячі» точки (наприклад, кратери вулканів і пожежі) виглядають червонуватими або жовтими. Можливе застосування цієї комбінації каналів – моніторинг пожеж. Затоплювані території виглядають темно-синіми і майже чорними, на відміну від комбінації 3-2-1, де вони виглядають сірими і погано помітні.
5-4-3	6-5-4	Як і комбінація 4-5-1, ця комбінація дає дешифрувальнику дуже багато інформації і колірних контрастів. Здорова рослинність виглядає яскраво-зеленою, а ґрунти – рожево-ліловими. На відміну від 7-4-2, що містить 7 канал і дає змогу вивчати геологічні процеси, ця комбінація дає можливість аналізувати сільськогосподарські угіддя. Є дуже зручною для вивчення рослинного покриву, її широко використовують для аналізу стану лісових угруповань
5-4-1	6-5-2	Комбінація подібна до 7-4-2, здорова рослинність виглядає яскраво зеленою), за винятком того, що ця комбінація є кращою для аналізу сільськогосподарських культур.
7-5-4	7-6-5	Ця комбінація не має жодного каналу з видимого діапазону, і забезпечує оптимальний аналіз стану атмосфери. Берегові лінії чітко помітні. Може бути використана для аналізу текстури і вологості ґрунтів. Рослинність виглядає блакитною.

ВЦЗ

5-3-1	6-4-2	Ця комбінація показує топографічні текстури, тоді як 7-3-1 дає змо-гу розрізняти гірські породи.

4.3 Попередня обробка космічних знімків Landsat

Як вже зазначалося в розділі 2 даної роботи, КЗ, які первісно отриму-ють із ШСЗ, записані у вигляді так званих «сірих значень» яскравості DN, які є непридатними для використання і потребують попередньої обробки.

Матеріали Landsat у тому виді, в якому вони надаються користувачеві, уже значною мірою скоректовані, наприклад, з урахуванням кривизни повер-хні Землі, особливостей рельєфу території, що знімається, застосоване масштабування в межах можливих значень реєстрованих величин тощо. Однак, усі ці корекції спрямовані, головним чином, на забезпечення надійного візуального дешифрування наземних об'єктів.

Якщо ж головним при аналізі космознімків стає не форма, малюнок і взаємне розташування об'єктів, а їх індивідуальні спектральні характеристи-ки (як для даної роботи), то потрібна додаткова корекція зображень. Крім то-го, тепловий канал, що міститься в матеріалах Landsat, починаючи з третьої місії, дозволяє досить точно визначити температуру підстильної поверхні. Для цього потрібно зробити певні обчислення з вихідними значеннями DN.

Конвертація значень яскравості вихідних каналів зображення у показники випромінювання на сенсорі.

ДДЗ, отримані з супутників серії LANDSAT, які поступають кінцевим користувачам проходять певну обробку, що включає радіометричну корек-цію й масштабування отриманих значень на шкалу можливих значень яскра-вості елемента зображення. Ці дані залежать від радіометричної розрізненно-сті матриці (кількості рівнів яскравості) і являють собою, таким чином, зна-чення, пропорційні кількості падаючої енергії (DN значення). DN є тими значеннями, які ми маємо первісно, одержавши знімок. Чим більшою є радіометрична розрізненність фотоприймальної матриці, тим більшим є діапазон значень, який може приймати перетворений з випромінювання сигнал. Для сенсора MSS цей діапазон 0-63 (2^6 = 64 можливих значення), для TM (ETM+) — 0-255 (2^8 = 256 можливих значень), що говорить про її

більш ви-

соку радіометричну розрізненність, а для сенсору OLI 8-ї серії ШСЗ — 0-4095 (2^{12} = 4096 значень, 12-bit).

Значення DN є безрозмірними, вони пропорційні кількості висхідного випромінювання й випромінювання, що попадає на сенсор (у літературі також можна зустріти наступні синоніми – upwelling radiance at-sensor, at-sensor radiance, spectral radiance), яке виміряється в наступних одиницях: [Вт / ($м^2$ · ср

· мкм)], тобто потік енергії (Ватт) на квадратний метр земної поверхні на один стерадіан (тривимірний кут від точки на поверхні Землі до сенсора) на одиницю вимірюваної довжини хвилі.

До запуску ШСЗ у космос на Землі визначається співвідношення між DN і вимірюваним потоком енергії. Цей процес називається *калібруванням сенсора*.

У більшості операцій з обробки ДДЗ (наприклад, при класифікації зображення) використовувати дійсні значення випромінювання не обов'язково, цілком достатньо масштабованих значень DN. Однак, коли в операції використовуються одночасно дані з декількох різних джерел (отримані за допомогою різних камер, TM-ETM+, MSS-TM, OLI тощо), наприклад, для аналізу змін (change detection), слід розуміти, що різні камери калібруються по різ-ному. У такому випадку потрібно звести ці дані, отримані з різних сенсорів, до

«єдиного знаменника». Це досягається за рахунок перетворення даних з DN у реальні значення прийнятого випромінювання за допомогою спеціаль-них формул.

У даній роботі використовувалась стандартна, описана в документації NASA, формула для перерахунку яскравості в значення верхньоатмосферної енергетичної яскравості, що надходить на сенсор (top of atmosphere radiance – TOA radiance):

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\max,\lambda} - L_{\min,\lambda}}{Q_{cal,\max} - Q_{cal,\min}} \cdot (DN - Q_{cal,\min}) + L_{\min,\lambda}, \quad (4.1)$$

ВІТЗ

cal *cal*, min min, ✦

де L_λ – кількість випромінювання, прийнятого сенсором ШСЗ; $L_{max,\ \lambda}$ – кількість прийнятого випромінювання, яке після масштабування стає Q_{max} (максимальне значення спектральної радіації для конкретного датчика ШСЗ для конкретного знімка); $L_{min,\ \lambda}$ – кількість прийнятого випромінювання, яке після масштабування стає Q_{min} (мінімальне значення спектральної радіації для конкретного датчика ШСЗ для конкретного знімка; $Q_{cal,\ max}$ – максимальне каліброване значення DN пікселя КЗ (255); $Q_{cal,\ min}$ – мінімальне каліброване значення DN пікселя КЗ (0 або 1); DN_{cal} – каліброване значення DN, тобто значення яскравості пікселя «сирого» КЗ.

Параметри, які потрібно підставити в формулу (3.1), як правило, нада-ються разом із самими даними Landsat, у файлі метаданих _MTL.txt.

Окрім того, для обчислення TOA radiance можна використовувати спрощений варіант формули (3.1), який запропонували Thome et al., 1994 і Lu et al, 2002:

$$L_{+} \bullet DN_{cal} \curvearrowright Gain_{+}. Bais_{+}, \qquad (4.2)$$

де L_λ –спектральна радіація, що потрапила на сенсор ШСЗ; DN_{cal} – значення яскравості пікселя «сирого» знімка; $Gain_\lambda$ – посилення значення радіації відносно яскравості вихідного знімка; $Bais_\lambda$ – зсув значення радіації відносно яскравості вихідного знімка [13].

Формула (3.2) аналогічна до формули (1.1), вона використовувалась у даній роботі.

Після розрахунку кожного пікселя знімка за формулою (3.2) отримуємо матрицю значень з плаваючої точкою (float) – нормалізовані геодані. Радіометричне калібрування виконувалось для кожного каналу кожного знімка.

Об’єднання відкаліброваних каналів даних в єдине мультис-пектральне зображення.

Задача полягає у тому, щоб склеїти деяку кількість растрових шарів (кожний з яких представлений файлом в одному з растрових форматів) у

ВІТ

єдиний, багатоканальний файл. Вихідний набір растрів, отриманий із сайту USGS, представлений на рис. 4.3.

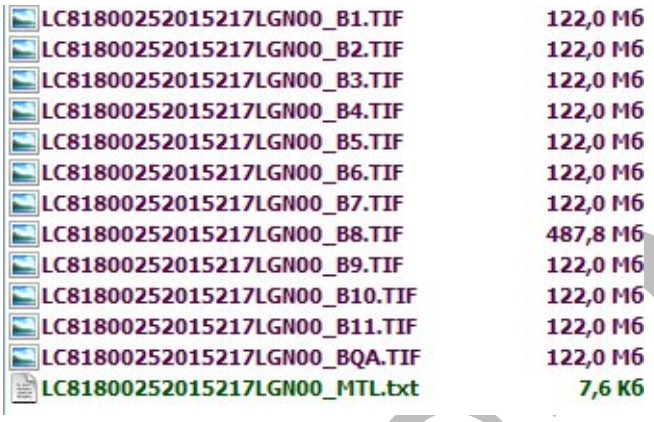


Рисунок 4.3. Початкові шари даних, отриманих із сайту Геологічної служби США

Склейка декількох одноканальних растрів в один багатоканальний є типовою задачею, з якою стикається будь-який фахівець, що починає працю-вати з багатоканальними даними, наприклад ДДЗ Landsat, ASTER, MODIS. Ці дані звичайно поширюються у вигляді декількох файлів, кожний з яких представляє певну частину спектру, в якій проводиться сканування (зйомка), кількість діапазонів, як правило, дорівнює кількості файлів, що надаються постачальниками даних (рис. 3.3).

Файл, що представляє зйомку в одному зі спектральних діапазонів, за-звичай називають каналом (channel, band), у термінах ГІС він являє собою ра-стровий шар.

Склеювання декількох шарів в один надає кілька переваг:

- даними більш зручно маніпулювати (копіювати, переміщувати то-що);
- дані можна візуалізувати у повнокольоровому режимі (RGB), вибираючи необхідну комбінацію каналів;
- аналіз даних також можна виконувати відразу по декількох каналах, а не по кожному окремо (наприклад, класифікацію, розрахунки індексів тощо).

ВГЗ

Виконаємо склеювання каналів для знімків Полтавської області, отри-маних з ШСЗ Landsat 8 та завантажених із сайту USGS, у програмному забез-печенні **ERDAS Imagine 2010**. У ERDAS Imagine ця процедура реалізується інструментом **Layer Stack**: Raster Tab → Resolution Group → Layer Stack.

У діалоговому вікні даного інструменту необхідно послідовно вибрати в пункті Input File шари растрових файлів, які являють собою зображення, отримані сенсором OLI у різних спектральних діапазонах. Причому, перший доданий шар буде останнім (нижнім) у результуючому файлі. Додавання растрових шарів виконується натисканням кнопки Add. Після додавання першого шару необхідно послідовно додати решту, у необхідній послідовності (зазвичай, від першого до останнього).

Після виконання цієї операції отримано два багатоспектральні відкалі-бровані КЗ, показані на рисунок 4.4.



а – КЗ LC81780262015187LGN00 б – КЗ LC81780262016094LGN00

Рисунок 4.4. Радіометрично відкалібровані багатоспектальні зображення дослі-дженої території

Атмосферна корекція космічних знімків серії Landsat 8 на до-сліджувану територію

Наступним етапом нормалізації геоданих є зменшення впливу на КЗ атмосфери і перетворення значень радіації, яка потрапила на сенсори супутника (TOA radiance), в значення реально відбитого від Землі спектрального випромінювання сонячного світла.

Вплив атмосфери на знімок проявляється в низці факторів: кут падіння і відбиття сонячних променів, прозорість атмосфери, газовий фактор і димка (рис. 4.5).

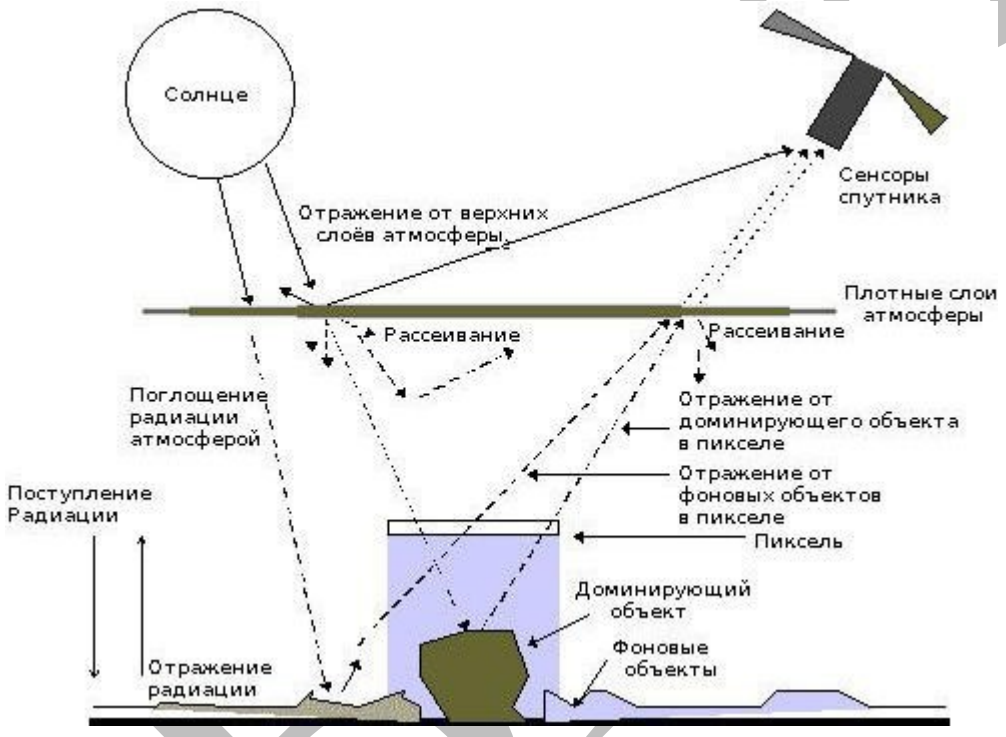


Рисунок 4.5. Фактори, які впливають на проходження відбитого сонячного випромінювання до сенсорів супутника

Корекцію виконуватимемо за допомогою модуля ATCOR 2 програмно-го забезпечення Erdas Imagine. В основі роботи модуля ATCOR лежить алго-ритм MODTRAN (розроблений Berk et al. 1989, Berk et al. 1998).

Точність MODTRAN-4 для зображент, отриманих у «вікнах прозорос-ті» атмосфери, складає 5-10% за умови відомих атмосферних параметрів (во-дяна пара, тип аерозолю, оптична щільність) та висоти Сонця над горизонтом

у межах від середніх до високих кутів (Staenz та ін., 1995). Також точність ATCOR залежить від точності алгоритму, яким описується розповсюдження випромінювання, і точності калібрування сенсора, яка складає,зазвичай, біля 5-10% (Slater та ін., 1987, Сантера та ін., 1992). Таким чином, сумарна точність моделі ATCOR становить біля 7-12% для сенсору за умови правильно заданих параметрів атмосфери.

При виконанні атмосферної корекції для кожного зі знімків була ство-рена маска хмар та маска води, яка для КЗ LC81780262015187LGN00 показа-на на рис. 4.6

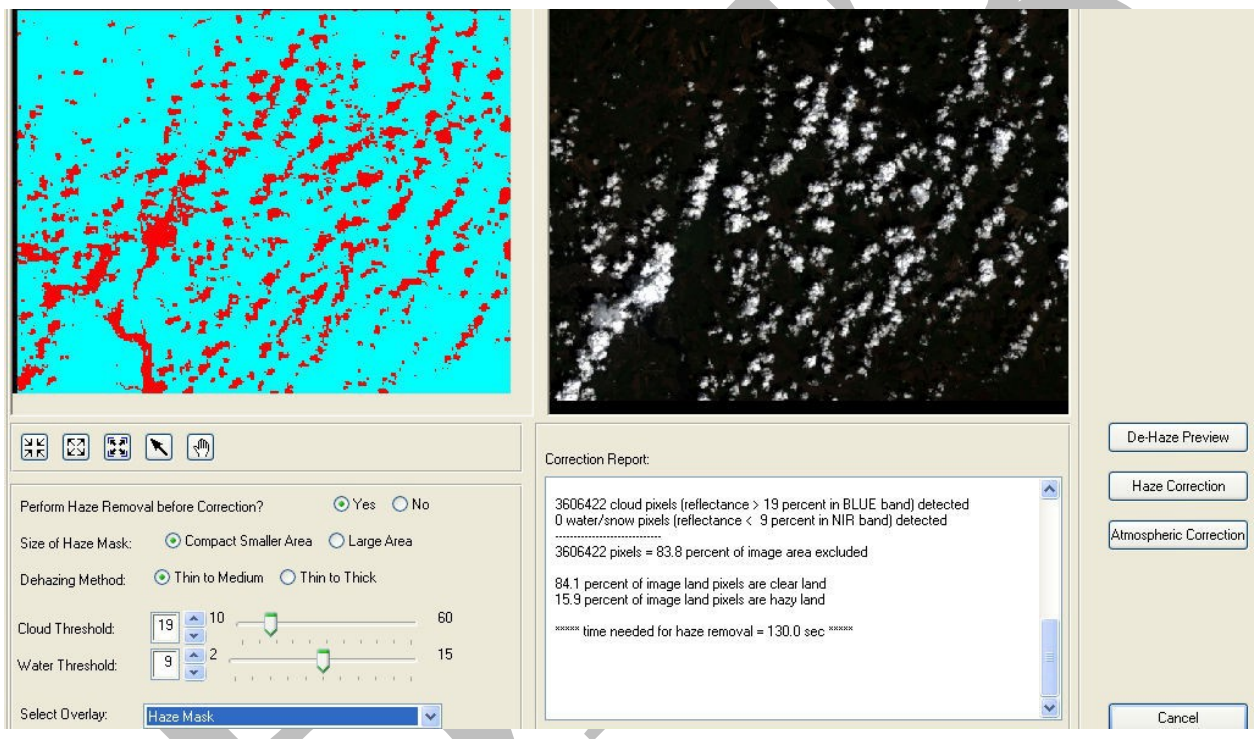
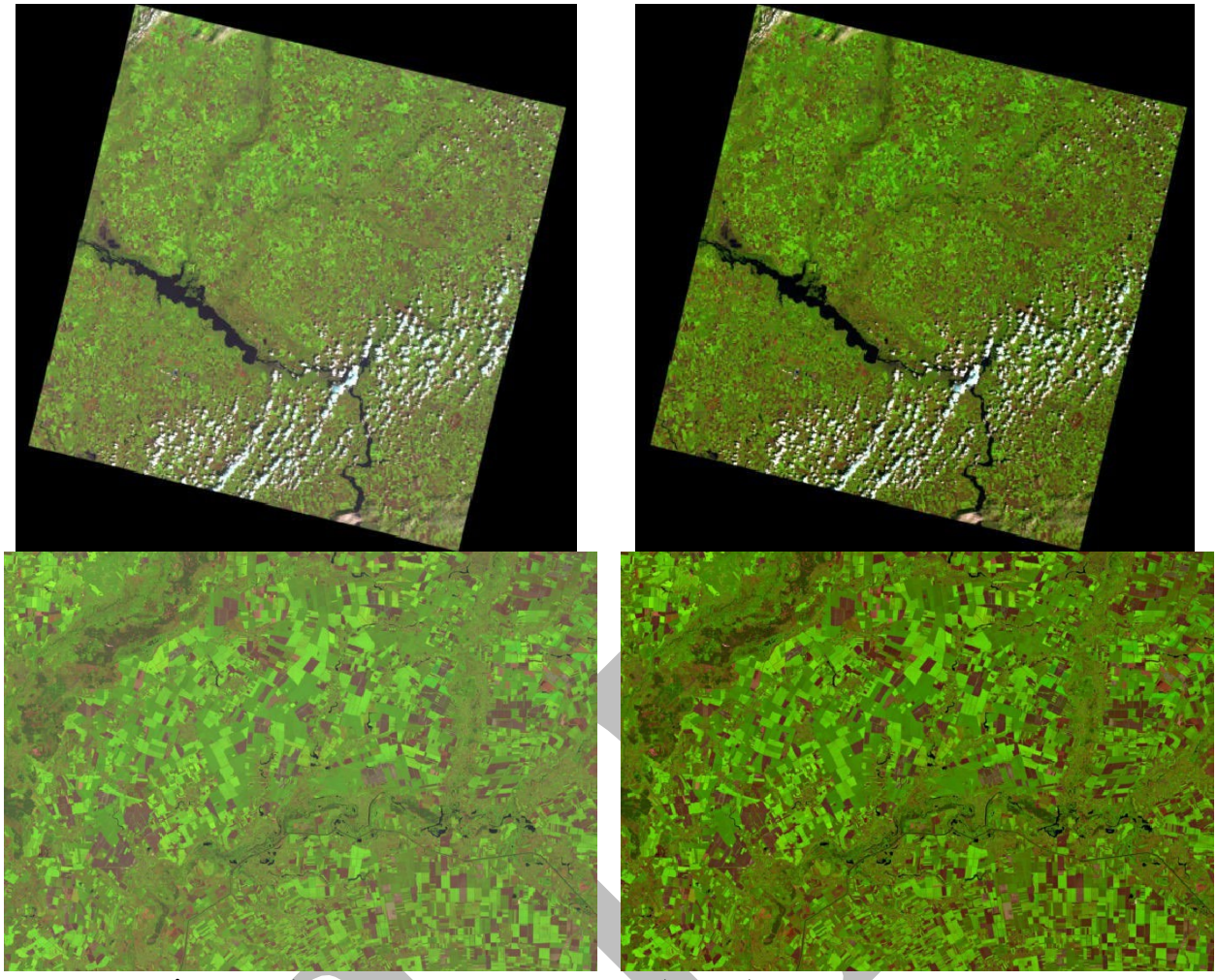


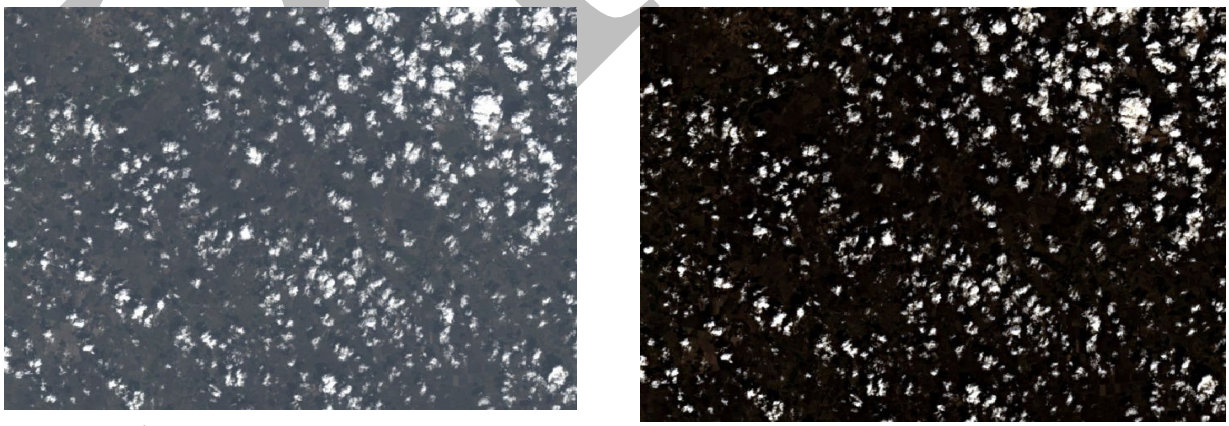
Рисунок 4.6. Маска хмар та води для КЗ LC81780262015187LGN00

Результати атмосферної корекції для КЗ LC81780262015187LGN00 і LC81780262016094LGN00 показано на рис. 4.7-4.8.



а – вихідне зображення б – зображення, скориговане за вплив атмосфери

Рис. 4.7. Результати атмосферної корекції (модуль ATCOR) для КЗ LC81780262015187LGN00 (комбінація каналів 6-5-4)

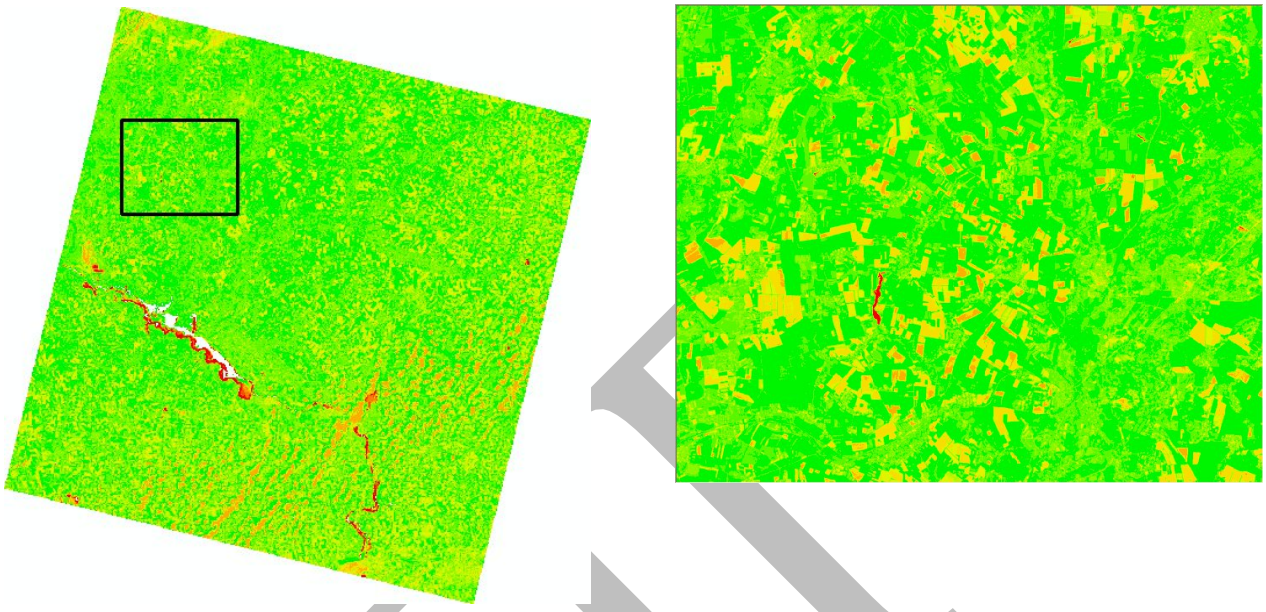


а – вихідне зображення б – зображення, скориговане за вплив атмосфери

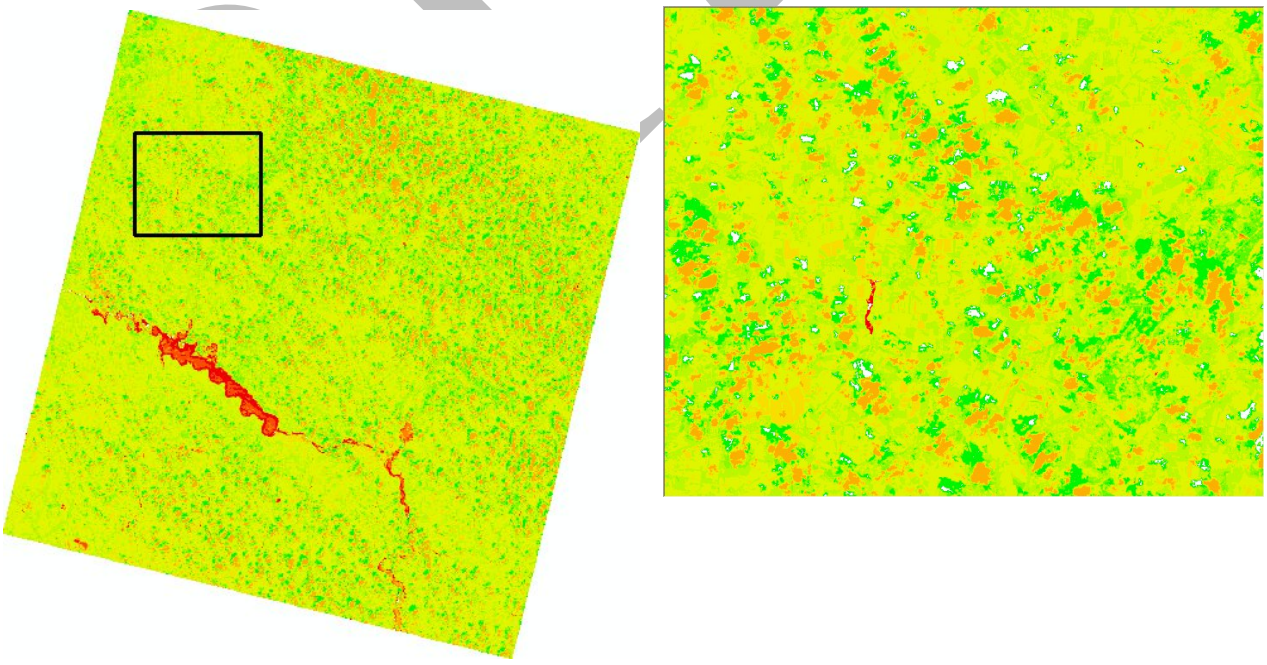
Рис. 4.8. Результати атмосферної корекції (модуль ATCOR) для КЗ LC81780262016094LGN00 (комбінація каналів 6-5-4)

Обчислення вегетаційних індексів **NDVI** для заданої території **(**частини Полтавської області**).**

На завершальному етапі роботи обчислимо та порівняємо BI NDVI для двох КЗ. Обчислення виконуватимемо в Erdas Imagine 2014, а їх результати покажемо на рис. 4.9-4.10.



а – візуалізоване значення BI NDVI б – фрагмент зображення BI NDVI
Рисунок 4.9. Обчислення BI NDVI для КЗ LC81780262015187LGN00



а – візуалізоване значення BI NDVI б – фрагмент зображення BI NDVI
Рисунок 4.10. Обчислення BI NDVI для КЗ LC81780262016094LGN00

Шкала BI NDVI для рис. 3.9-3.10 є наступною: — -1 ÷ - 0,780392157, — -0,780392157 ÷ -0,396078431, —-0,396078431 ÷ -0,105882353, — -0,105882353 ÷ 0,105882353, — 0,105882353 ÷ 0,262745098, — 0,262745098 ÷ 0,419607843, — 0,419607843 ÷ 0,6, — 0,6 ÷ 0,77254902, — 0,77254902 ÷ 0,91372549, — 0,91372549 ÷ 1.

Порівнюючи рис. 3.9 і 3.10, можна зробити висновок, що на рис. 3.9 домінують більш яскраві зелені кольори (більші значення NDVI), що свід-чить про високу густоту рослинності (на 06.07.2015 порівняно з 30.04.2016).

Середні значення BI NDVI та середні квадратичні відхилення для двох зображень становлять, відповідно: 0,72454189966843 і 0,32982518331497, 0,39129041409619 і 0,28820600904628 (це є безрозмірні величини, оскільки NDVI є безрозмірною величиною). Тобто середнє значення NDVI для LC81780262015187LGN00 є вищим, ніж для LC81780262016094LGN00.

NDVI несе інформацію про загальну кількість рослинності і використо-вується для оцінки її стану при вирішенні широкого кола задач.

Той факт, що на зображенні розподілу значень BI NDVI за липень, тоб-то станом на місяць, на який припадає пік вегетації рослин, середнє значення NDVI є вищим, підтверджує правильність розрахунків.

Таким чином, аналізуючи зображення розподілу значень BI NDVI за рі-зні періоди вегетації рослин впродовж року (або якогось іншого визначеного проміжку часу), можна отримувати інформацію щодо стану рослинного покриву.

ВІТЗ

ВИСНОВКИ

Рослинність є компонентом біосфери, якому притаманні унікальні утворюючі, водозахисні, ґрунтозахисні та інші системні функції. Засвоюючи в процесі фотосинтезу двоокис вуглецю, воду, мінеральні компоненти, рос-лини утворюють органічні речовини – джерело енергії та їжі усіх живих ор-ганізмів і виділяють життєво необхідний кисень. Значною є роль рослин в мі-грації хімічних елементів та у підтримці балансу існуючих в природі взає-мозв'язків, а також в утворенні ґрунтів та формуванні ландшафтів. За участю рослинності формується клімат, підтримуються водний баланс і необхідний для живих організмів склад приземної атмосфери, тощо. Тому вивченню ста-ну рослинності, достовірному і точному оцінюванню її кількісних та якісних показників приділяється велика увага.

Для регіонів України актуальною є задача визначення продуктивності сільськогосподарських земель, постійний моніторинг їх використання та оцінювання стану рослинності. Методи оцінювання стану рослинності можна поділити на дві великі групи: контактні та дистанційні. Контактні методи визначення кількісно-якісних характеристик рослинності вимагають часткового пошкодження або повного знищення рослин. Тому, безумовно, більш ефек-тивними й перспективними є дистанційні методи оцінювання стану рослинності. У даній роботі розглянуто процес визначення стану рослинного покриву частини території Полтавської області за допомогою нормалізованого різ-ницевого вегетаційного індексу NDVI, який містить у собі наступні етапи:

1. Отримання космічних знімків на територію дослідження.

2. Попередня обробка космічних знімків:

2.1. Виконання радіометричної корекції знімків, тобто конвертація значень яскравості вихідного зображення у показники випромінювання на сенсорі.

2.2. Виконання атмосферної корекції космічних знімків за допомогою модуля ATCOR ERDAS Imagine за методом MODTRAN.

3. Обчислення вегетаційного індексу NDVI за відкаліброваними супутниковими знімками.

4. Кількісний аналіз та інтерпретація отриманих результатів.

Вибір вегетаційного індексу NDVI для розрахунків обумовлений властивостями зон спектру, які використовуються для його обчислення. На червону зону спектру (0,62-0,75 мкм) припадає максимум поглинання сонячного випромінювання хлорофілом, а на ближню інфрачервону зону (0,75-1,3 мкм) – максимальне відбиття сонячної енергії клітинною структурою листа.

Нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI характеризує щільність рослинності, що дозволяє оцінити схожість і зростання рослин та продуктивність угідь. Індекс розраховується як різниця значень коефіцієнтів відбиття у ближній інфрачервоній та червоній областях спектру, поділена на їх суму.

Для виконання оцінки змін рослинного покриву на території дослі-дження (частини Полтавської області) були використані супутникові знімки актуальної на даний час місії Landsat 8 з просторовою розрізненністю 30 м на місцевості та радіометричною розрізненністю 16 біт. Знімки досліджувалися на момент піку вегетації (липень, 2015 р.) та на кінець минулого місяця (квітень, 2016 р.). Розраховані значення вегетаційного індексу NDVI свідчать про зменшення густини рослинності за зазначений період часу, що повністю відповідає теорії вегетації рослин.

Організація спостереження за станом рослинного покриву дозволяє да-ти об’єктивну оцінку його змінам, прогнозувати його розвиток або деграда-цію, визначити розмір екологічного та економічного прибутку або збитку, оперативно вирішувати питання управління та оптимізації фінансування проектних та експлуатаційних заходів (наприклад, щодо підвищення фітомаси сільськогосподарських культур).

ВІЗ

Список використаних джерел

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялько та М. О. Попова. – Київ: Наукова думка, 2006. – 360 с.

2. Бурштинська Х. В. Аерокосмічні знімальні системи / Х. В. Бурштинська, С. А. Станкевич. – Львів: вид-во НУ «Львівська політехніка», 2013. – 316 с.
3. ГИС-лаборатория: http://gis-lab.info (електронний ресурс).
4. Гілітуха Д.В. Підходи до оцінки надземної фітомаси лісів з використанням даних дистанційного зондування Землі / Д.В. Гілітуха // Наук. вісн. НУБіП України. – 2011. – Вип. 164, Ч. 1. – С. 26-36.
5. Гілітуха Д.В. Розроблення моделей оцінки надземної фітомаси за даними ДЗЗ / Д. В. Гілітуха, А. Ю., Терентьєв, О. В. Шевчук // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2012. – Вип. 171. Ч. 2. – С. 33-40.
6. Готинян В. С. Деякі тенденції в дистанційному зондуванні Землі / В. С. Готинян, І. С. Дронова // Космічна наука і технологія. – 2002. – Т.8. – № 2/3. – С.65-69.
7. Гребень А.С. Анализ основных методик прогнозирования урожайности с помощью данных космического мониторинга, применительно к зерновым культурам степной зоны Украины / А.С. Гребень, И.Г. Красовская // Науково-технічний журнал. – 2013. – № 1(7). – С. 105-119.
8. Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять : ДСТУ 4758:2007. – [Чинний від 2007-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 21 с. – (Національний стандарт України).
9. Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення

понять : ДСТУ 4220-2003. – [Чинний від 2004-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 24 с. – (Національний стандарт України).

10. Дорожинський О. Л. Фотограмметрія: Підручник / О. Л. Дорожинський, Р. Тукай. – Львів: вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 332 с.
11. Доскоч А. Оцінювання точності великомасштабних цифрових карт / А. Доскоч, В. Тарнавський, В. Літинський // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2009. – Випуск І (17). – С. 222-230.
12. Жолобак Г.М. Використання методів дистанційного зондування землі для моніторингу агроресурсів України / Г.М. Жолобак // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 6. – С. 16-23.
13. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2013-2017 роки.
14. Зацерковний В.І. Технології дистанційного зондування Землі в задачах оцінки врожайності / В.І. Зацерковний, Зінченко І.М., Кривоберець С.В., Углицьких Є.К. // Вісник Астрономічної школи. – 2015. – Т.11, №1-2. – С.75-83.
15. Колесник В.И. Применение ДЗЗ и ГИС технологий для прогнозирования урожайности зерновых / В.И. Колесник В.И., К.В. Колесник, В.П. Петренкова, В.В.Попов, Д.В.Смаглюк, В.Ю.Чех // Ученые записки Тав-рического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Серия «География». – 2003. – Том 16 (55), № 2. – С. 73-80.
16. Колотий А.В. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы по различным спутниковым данным / А.В. Колотий // Індуктивне моделювання складних систем. – 2014. – Випуск 6. – С. 107-116.
17. Кохан С. С. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи. Підручник / С.С. Кохан, А. Б. Востоков. – К.: Вища шк., 2009. – 511 с.
18. Кохан С. С. Застосування вегетаційних індексів на основі серії космічних знімків IRS-1D LISS-III для визначення стану посівів сільськогосподарських культур / С.С. Кохан // Космічна наука і

технологія. – 2011. – Т. 17, № 5. – С. 58-63.

19. Кохан С.С. Застосування вегетаційних індексів нормалізованої різниці та зваженої різниці при визначенні стану сільськогосподарських куль-тур (Представлено академіком НАН України В. І. Ляльком) / С.С. Кохан // Доповіді НАН України. – 2012. – №2. – С. 135-140.
20. Кривобок О.А. Оцінка стану озимої пшениці після перезимівлі з використанням системи CGMS / О.А. Кривобок, О.О. Кривошеїн, Т.І. Адаменко, Т.М. Рубан // Геополитика и экодинамика регионов. – 2014. – Т.10. – С. 663-668.
21. Куссуль Н.Н. Регрессионные модели прогнозирования урожайности зерновых в Украине по спутниковым данным различной природы / Н. Н. Куссуль, А. В. Колотий, С. В. Яцков, Т. В. Олейник // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2013. – № 1. – С. 94-101.
22. Куссуль Н. Оценка состояния растительности и прогнозирование урожайности озимых культур Украины по спутниковым данным / Н. Куссуль, Н. Ильин, С. Скакун, А. Лавренюк // International Book Series "Decision Making and Business Intelligence, Strategies and Techniques" (ed. Markov K., Ivanova K., Mitov I.) – 2008. – N 3. – P.103-109.

ВПЗ

ВЦТЗ