

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО

ФАКУЛЬТЕТ ЗЕМЛЕВПОРЯДКУВАННЯ
ТА ІНФРАСТРУКТУРНОГО РОЗВИТКУ

КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ І ГЕОІНФОРМАТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Рівня вищої освіти «Магістр»

НА ТЕМУ:

«Аналіз змін землекористування з використанням
супутникових знімків Sentinel та Landsat»

Виконав: студент групи ЗВ-63

Напряму підготовки (спеціальності)

193 «Геодезія та землеустрій»

Липко Б.С.

Керівник: доцент Бочко О.І.

Дубляни- 2025

ВСТУП	
1.ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИСАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ	6
1.1. Принципи дистанційного зондування	6
1.2. Характеристики супутникових платформ Sentinel та Landsat	11
1.3 Дистанційне зондування Землі у вивченні змін землекористування	15
РОЗДІЛ 2. ВИХІДНІ ДАНІ, МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ	21
2.1. Характеристика супутникових даних Sentinel-2 та Landsat 8/9	21
2.2 Методи класифікації земного покриву	24
2.3 Технологічні засоби аналізу (QGIS, ArcGIS, Google Earth Engine)	27
3. МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ЗМІН ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ	32
3.1. Характеристика території дослідження	32
3.2 Процедура класифікації земного покриву за зображеннями Sentinel та Landsat	37
3.3 Алгоритм визначення змін землекористування	40
4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	47
ВИСНОВОК	50
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	52

УДК 528.8:504.5:004.9

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню змін землекористування на основі багатоспектральних супутникових знімків Sentinel-2 та Landsat 8/9 із застосуванням сучасних методів дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу. У роботі проведено оцінювання просторово-часових трансформацій земного покриву, розроблено алгоритм виявлення змін, виконано класифікацію територій з використанням спектральних індексів, інструментів QGIS, ArcGIS та Google Earth Engine, а також проведено аналіз точності результатів.

Метою дослідження є підвищення ефективності моніторингу стану земнокористування шляхом інтеграції супутникових даних різної роздільності, розробки комплексної методики класифікації та застосування сучасних алгоритмів обробки просторової інформації.

У роботі охарактеризовано природні та антропогенні чинники, що впливають на структуру земного покриву Івано-Франківської області. Детально проаналізовано спектральні показники рослинності, водних ресурсів та урбанізованих територій. Особливу увагу приділено методам post-classification comparison, image differencing та алгоритмам машинного навчання для виявлення змін. Отримані результати дозволили виявити ключові просторові тенденції трансформацій землекористування та провести порівняльний аналіз екосистемних процесів.

ВСТУП

Сучасні процеси трансформації ландшафтів зумовлені інтенсивною діяльністю людини, змінами клімату та природними феноменами. Вивчення тенденцій землекористування стає ключовим завданням екологічного моніторингу, оскільки зміни структури земного покриву безпосередньо впливають на стан екосистем, водний баланс, біорізноманіття та сталий розвиток територій. Традиційні методи спостереження за поверхнею Землі часто є обмеженими у масштабі, трудомісткими та фінансово затратними. У цьому контексті технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стають незамінним інструментом для оперативного, достовірного та багатоаспектного аналізу земного покриву.

Супутникові системи Sentinel та Landsat забезпечують доступ до високоякісних мультиспектральних знімків, що відзначаються регулярністю повторних спостережень, широким спектральним діапазоном та тривалими історичними архівами даних. Це створює унікальну можливість досліджувати як короткострокові, так і довготривалі зміни землекористування. Поєднання можливостей обох супутникових платформ дозволяє виконувати всебічний аналіз територій, зокрема в регіонах зі складним рельєфом, таких як Івано-Франківська область.

Проблематика дослідження змін землекористування є особливо актуальною для гірських та передгірських територій, де природні процеси й антропогенний тиск створюють складні просторові патерни. Виявлення змін у лісових масивах, сільськогосподарських угіддях, урбанізованих ділянках та водних екосистемах має ключове значення для управління земельними ресурсами, планування територій і розробки заходів щодо адаптації до глобальних змін.

Метою роботи є розробка та удосконалення алгоритму визначення змін землекористування на основі зображень Sentinel та Landsat із використанням методів спектрального аналізу, класифікації та геоінформаційних технологій.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: охарактеризувати територію дослідження; дослідити основні підходи до класифікації земного покриву; розробити алгоритм виявлення змін; здійснити класифікацію та порівняльний аналіз даних; оцінити точність отриманих результатів.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному поєднанні даних Sentinel та Landsat для підвищення стабільності виявлення змін, а також у застосуванні сучасних моделей обробки просторової інформації для дослідження динаміки ландшафтів.

Практична значущість полягає у можливості використання отриманих результатів для екологічного моніторингу, лісоуправління, контролю землекористування, виявлення незаконних рубок, моделювання аграрних процесів та просторового планування.

1. Теоретичні основи дистанційного зондування Землі

1.1. Принципи дистанційного зондування

Дистанційні методи дослідження являють собою комплекс технічних засобів та аналітичних підходів, що забезпечують отримання та інтерпретацію фото-, відео- та телевізійних матеріалів, а також спектральних даних природних і антропогенних об'єктів, які надходять із літальних апаратів та космічних платформ. Сучасна розробка й використання таких методів для дослідження природного середовища, моніторингу стану довкілля та динаміки його змін сформували окремий перспективний напрямок — дистанційний моніторинг.

Основними практичними перевагами дистанційних методів є можливість комплексного охоплення великих територій та різнорідних компонентів довкілля. Це проявляється у трьох типах інтеграції:

- горизонтальній, що забезпечує фіксацію значних ділянок земної поверхні в одному зображенні;
- вертикальній, яка дозволяє одночасно спостерігати складові ландшафту — літосферу, гідросферу, атмосферу, біосферу та антропосферу;
- динамічній, що полягає у періодичному отриманні знімків тієї самої місцевості для реєстрації змін у часі.

Залежно від просторового масштабу інтеграції результати дистанційних спостережень поділяються на:

- глобальні, які охоплюють усю або майже всю освітлену півкулю Землі;
- регіональні, що дозволяють досліджувати великі території країн чи природних районів;
- локальні, які надають детальну інформацію про окремі ділянки та ландшафти.

Використання дистанційних технологій дає можливість:

- виявляти сторонні речовини у повітрі, ґрунті чи воді;
- визначати специфічні типи забруднювачів і проводити їх класифікацію;
- досліджувати динаміку концентрацій домішок у часі;

- контролювати джерела забруднення, шляхи перенесення та кінцеві зони їх накопичення;
- оцінювати загальний стан довкілля і ступінь його вразливості до негативних впливів;
- отримувати інформацію для моделювання та прогнозування стану природних систем;
- вести моніторинг природних ресурсів (геологічних, водних, ґрунтових, біологічних тощо);
- виявляти дрейф морських крижаних мас і прогнозувати зміни у структуруванні урбанізованих територій.

Принцип роботи приладів для дистанційних спостережень базується на тому, що природні та біологічні об'єкти по-різному поглинають і відбивають електромагнітне випромінювання у видимому, ультрафіолетовому та інфрачервоному діапазонах, а також у радіохвилях штучних джерел. Ці прилади конструктивно об'єднують у радарні та лазерні сканувальні системи, які розміщують на літаках і супутниках. Найбільш придатною для дистанційного контролю є середня інфрачервона область спектра, оскільки багато забруднювальних речовин мають у ній характерні лінії поглинання. Спостереження можуть проводитися як удень, так і вночі, що особливо важливо для моніторингу важкодоступних територій, таких як тропічні ліси чи полярні регіони.

Перевага дистанційних вимірювань атмосферних домішок полягає в можливості безперервного контролю середніх концентрацій забруднювачів на великих площах та визначення їх вертикального профілю. Методи ДЗЗ також дозволяють простежити напрямок та швидкість переміщення газоподібних домішок.

Перенесення забруднювальних газів спостерігають як із наземної мережі станцій, так і за допомогою мобільних комплексів, розміщених на автомобілях та авіаційних платформах. Концентрації визначають за допомогою

спектрометрії прямого та розсіяного сонячного чи місячного випромінювання, а також резонансних методів.

Одним із найперспективніших підходів є активний адсорбційний метод, що використовує лазерне випромінювання та оптичний гетеродин, який реєструє відбитий від поверхні сигнал. Цілодобові вимірювання дають змогу будувати карти горизонтального розподілу забруднень та профілі концентрацій газів у різних шарах атмосфери.

Особливо добре організована система спостережень за вмістом озону. Міжнародна мережа включає близько ста станцій, причому значна частина з них функціонує на території країн СНД, зокрема й в Україні.

Для дослідження димових забруднень широко використовують космічні знімки. Найбільшу відбивну здатність димові шлейфи мають у синьо-зеленій частині спектра (0,4–0,5 мкм). Вони добре помітні на локальних аерофото та на космічних зображеннях супутників «Landsat-1» і «Landsat-2». Метеорологічні супутники також безперервно реєструють виверження вулканів.

Пилові забруднення визначають за космічними фото, які дозволяють оцінити масштаби пилових бур, встановити характер переміщень пилових мас, їх склад і зони випадання.

У містах дистанційні методи дають змогу контролювати джерела викидів, оцінювати рівень забруднення та простежувати його зміни. Для цього застосовують пасивні прилади — мас-спектрометри, фільтрові радіометри на SO_2 та NO_2 , а також активні засоби: лідари диференційного поглинання-розсіювання, флуоресцентні та комбінаційні системи. Лідари дозволяють виявляти широкий спектр забруднювачів (SO_2 , NO_2 , NO , Cl_2 , Hg , бензол, формальдегід) на відстанях до 6 км.

Основою ДЗЗП є формування мультиспектральних та гіперспектральних зображень, у яких кожен піксель характеризується певним спектральним підписом. Це дозволяє розрізняти типи поверхні з високою точністю та проводити тематичне картографування. Наприклад, у ближньому інфрачервоному діапазоні добре проявляються властивості рослинності, у

короткохвильовому інфрачервоному — параметри вологості ґрунту, у видимому — характеристики відкритих земель і водних об'єктів.

Важливою перевагою дистанційного зондування земної поверхні є можливість забезпечення високої часової регулярності спостережень. Сучасні супутникові системи, як-от Sentinel-2 і Landsat-8/9, формують глобальні архіви знімків із частотою від кількох днів до двох тижнів. Це дозволяє не лише фіксувати стан територій у певний момент часу, але й аналізувати динаміку їх розвитку, будувати тренди, визначати аномалії та прогнозувати зміни. Сукупність методів ДЗЗП дає змогу інтегрувати наземні, супутникові та модельні дані, що значно підвищує якість природоохоронного управління, просторового планування, сільськогосподарського менеджменту та екосистемного моніторингу. В умовах глобальних кліматичних змін дистанційне зондування земної поверхні відіграє ключову роль у формуванні достовірної інформаційної основи для наукових досліджень, аналітики та прийняття управлінських рішень.

Останнім часом все більшого поширення набувають сучасні методи дистанційного дослідження ділянок суші земної поверхні із застосуванням супутників, лазерної і радарної техніки. Існує різноманітна апаратура для радарної аерозйомки (РАЗ), яка дає оперативну та детальну інформацію. РАЗ є потужним узагальнюючим засобом вивчення ландшафтних особливостей. Усепогодність методу дозволяє здійснювати зйомку у критичний фенологічний пе-ріод, коли відмінності рослинних асоціацій виражені найбільш чітко. Одним з найбільш поширених дистанційних методів вивчення вмісту вологи в ґрунтах є метод НВЧ-радіометрії. Цей метод дозволяє визначати: ступінь зволоження, запаси вологи, якість поливу посівів, мінералізацію водоймищ, фільтрацію води з магістральних каналів, ділянки суші з високими рівнями ґрунтових вод. Визначення дистанційними методами вмісту гумусу в ґрунтах ґрунтується на визначенні у видимій і ближній ІЧ областях спектру (0,4–1,2 мкм) коефіцієнта яскравості, який корелює і зменшується зі збільшенням вмісту гумусу в горизонті А1. У зв'язку з інтенсивним освоєнням земель велике значення має

складання карт, на яких відображають ерозійні процеси (вітрової і водної ерозії).

Методи дистанційної індикації засолених ґрунтів використовують оптичний і радіотепловий діапазон. Встановлено, що солі відрізняються найвищим з ґрунтових утворень значенням яскравості. За допомогою матеріалів, отриманих радарними чи лазерними сканувальними системами, встановленими на літальних апаратах, можна визначити висоту дерев, кількість рослин, виміряти потік енергії, що входить в екосистему та виходить з неї (співвідношення поглинутої та відбитої радіації), отримати дані, які дозволяють передбачити поширення і статистичні параметри рослинності в зонах, де немає наземного контролю.

Особливо перспективними є лазерні дослідження, за допомогою яких можна здійснити облік пасовищ або ділянок, що обробляються, локалізувати та виміряти осередки поширення фітопатогенних факторів, виявити лісові пожежі тощо. За допомогою аерофотозйомки та дешифрування отриманих знімків можна визначити зімкнутість та щільність лісу, провести лісопатологічні дослідження. Сухостій у насадженнях в більшості випадків надійно виділяється за допомогою спектрозональних аерознімків. Деревостани та окремі дерева, пошкоджені пожежею, ентомо- та фітошкідниками, за характером зображення помітно відрізняються на аерознімках від здорових дерев. Аерофотозйомка, що проводиться після пожежі у важкодоступній місцевості, дає можливість визначити вид пожежі і ступінь пошкодження насаджень, а також намітити різні лісогосподарські заходи.

Основними напрямками розвитку аерокосмічного моніторингу екосистем є використання реєстрацій відбивання світла і власного випромінювання Землі в різних спектральних інтервалах: візуальні спостереження (0,40–0,64 мкм), фотографування (0,40–0,92 мкм), спектрофототитрування (0,4–2,5 мкм), телевізійна зйомка (0,45–0,75 мкм), тепла ІЧ зйомка (2,6–5,5 і 8,0–14,0 мкм), 38 багатоспектральна зйомка (0,32–12,5 мкм), мікрохвильова зйомка (> 0,3 см), а також активні методи локації. При дослідженні водно-болотних угідь добре

зарекомендував себе метод радіолокаційної зйомки. Великі перспективи для вивчення болотних масивів відкриває багатозональна зйомка. Дистанційні дослідження знаходять застосування і в сільському господарстві. Різноманітні форми впливу людини на природні ландшафти, як правило, добре розпізнаються на аерознімках. На середньомасштабних аерознімках (1: 25 000) розрізняють основні типи культур і дуже окультурені ландшафти, на крупномасштабних (1: 10 000) – всі типи окультурених ландшафтів. При сільськогосподарському дешифруванні знімків велике значення має розпізнавання культурної рослинності, вторинної рослинності цілини та культуро-технічного становища пасовищ і сіножатей.

1.2. Характеристики супутникових платформ Sentinel та Landsat

Супутникові платформи Sentinel та Landsat посідають ключове місце в сучасній системі дистанційного зондування Землі, забезпечуючи отримання високоточних, стандартизованих та довготривалих даних для моніторингу природних і антропогенних процесів. Характеристики цих місій визначають наукову й практичну цінність отриманих матеріалів, а також можливість їх інтеграції у комплексні геоінформаційні дослідження. Програма Sentinel, що реалізується Європейським космічним агентством у межах ініціативи Copernicus, включає серію спеціалізованих супутників, серед яких Sentinel-2 є основним джерелом високоякісних оптичних мультиспектральних даних. Платформа Sentinel-2 характеризується мультиспектральною зйомкою у 13 спектральних каналах із просторовою роздільністю 10, 20 та 60 м, що дозволяє враховувати спектральну різноманітність природних об'єктів та забезпечує високу деталізацію у видимому й ближньому інфрачервоному діапазонах. Завдяки включенню кількох каналів у зоні red-edge забезпечується підвищена чутливість до стану рослинності, що є важливим для агромоніторингу та екологічних досліджень. Орбіта супутника зі стабільною повторюваністю знімання приблизно раз на п'ять днів забезпечує високу часову роздільність, що підвищує ймовірність отримання безхмарних даних і підтримує оперативний

моніторинг динамічних процесів. Ширина смуги знімання понад 290 км забезпечує охоплення великих територій за короткий час, що є вагомим перевагою при роботі з регіональними та національними картографічними задачами.

У свою чергу, програма Landsat, яку реалізують NASA та Геологічна служба США, має унікальне історичне значення, оскільки забезпечує найдовшу в світі безперервну серію супутникових спостережень, що розпочалася у 1972 році. Актуальні платформи Landsat 8 та Landsat 9 обладнані сенсорами OLI та TIRS, які охоплюють мультиспектральний та тепловий діапазони. Просторова роздільність Landsat становить 30 м для більшості мультиспектральних каналів, 15 м для панхроматичного та 100 м (із перерахуванням до 30 м) для теплових каналів. Хоча Landsat поступається Sentinel-2 за просторовою роздільністю у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, він має принципову перевагу у вигляді наявності теплових каналів, які дозволяють визначати температуру поверхні, аналізувати водний баланс, виявляти міські теплові острови та здійснювати моніторинг гідрологічних і геотермальних процесів. Часова повторюваність знімання становить 16 днів для кожного апарата, або приблизно 8 днів у разі комбінованого використання Landsat 8 і Landsat 9. Незважаючи на меншу частоту оновлення порівняно із Sentinel-2, платформа Landsat відзначається винятковою стабільністю радіометричного калібрування та високою сумісністю даних між різними поколіннями супутників, що є критично важливим для дослідження довготривалих тенденцій змін земної поверхні.

Порівняння характеристик Sentinel та Landsat показує, що ці місії виконують взаємодоповнювальні функції, які разом формують комплексну основу для сучасного Землезнавства. Sentinel-2 забезпечує високу просторову й часову роздільність, що робить його оптимальним для оперативного моніторингу рослинності, лісових екосистем та землекористування. Натомість Landsat, завдяки своїй тривалій архівній історії та тепловому діапазону, є незамінним джерелом даних для аналізу багаторічних процесів, вивчення

температурних характеристик поверхні, визначення трендів зміни земного покриву та побудови глобальних аналітичних моделей.

В таблиці 1.1. подані основні характеристики супутників Sentinel та Landsat

Характеристика	Sentinel-2	Landsat 8
Просторова роздільна здатність	10 м/піксель	30 м/піксель
Періодичність зйомки	5 днів	8 днів
Ретроспективність	з серпня 2015 року	з травня 2013 року
Кількість фото за сезон	54 (березень–жовтень)	34 (березень–жовтень)
Продукти	Зображення у натуральних кольорах; Вегетаційний індекс NDVI	Зображення у натуральних кольорах; Вегетаційний індекс NDVI; Температура ґрунту; Засніженість

Таким чином, супутникові платформи Sentinel та Landsat мають різні, але взаємодоповнювальні технічні та спектральні характеристики, що зумовлює їхнє широке застосування у наукових, екологічних, економічних та управлінських задачах. Інтеграція даних обох місій забезпечує найвищу якість і надійність результатів, поєднуючи оперативність і високу деталізацію Sentinel-2 з довготривалою стабільністю та унікальними тепловими можливостями Landsat.

Супутникові системи Landsat 9 та Sentinel-2 належать до найважливіших інструментів дистанційного зондування Землі, що забезпечують отримання високоточних даних для аналізу природних процесів, землекористування та стану довкілля. Незважаючи на подібність функціонального призначення, ці місії суттєво відрізняються за конструктивними параметрами, спектральними

особливостями та операційними характеристиками, що визначає їхню роль у різних галузях моніторингу.

Landsat 9 забезпечує просторову роздільність 30 метрів у видимому, ближньому інфрачервоному (NIR) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах. Теплові канали мають роздільність 100 метрів, а панхроматичний канал забезпечує точність до 15 метрів, що дає змогу отримувати детальну інформацію про міські території, сільськогосподарські угіддя та інші об'єкти інфраструктури. На відміну від цього, Sentinel-2 пропонує роздільну здатність 10 метрів у видимій та ближній інфрачервоній частинах спектра, що робить його високоефективним у дослідженнях рослинних покривів, водних поверхонь та інших природних компонентів. Діапазони SWIR та Red Edge у Sentinel-2 мають роздільність 20 метрів, тоді як атмосферний канал із роздільністю 60 метрів використовується для покращення атмосферної корекції та підвищення загальної точності спектральних вимірів.

Часові параметри роботи супутників також демонструють різну специфіку застосування. Landsat 9 здійснює повторне знімання території раз на 16 днів, що забезпечує формування тривалих часових серій даних і створює умови для всебічного відстеження поступових змін на земній поверхні. Sentinel-2, навпаки, характеризується значно частішою повторюваністю — приблизно раз на 5 днів, що робить його надзвичайно корисним для аналізу динамічних природних процесів, сезонних тенденцій, змін у землекористуванні, а також для оперативного реагування на надзвичайні події.

Суттєвою відмінністю між платформами є їхня радіометрична глибина. Landsat 9 використовує 14-бітну роздільність, яка забезпечує запис 16 384 рівнів яскравості. Така детальність дозволяє виявляти навіть незначні відмінності у спектральних характеристиках поверхні й формувати більш точні моделі природних процесів. У свою чергу, Sentinel-2 має 12-бітну глибину, що відповідає 4096 рівням інтенсивності. Попри дещо нижчу деталізацію, така роздільність цілком достатня для екологічних, аграрних та картографічних

досліджень, де ключову роль відіграє частота оновлення та спектральна насиченість даних.

Обсяг інформації, який генерують обидві місії, також різниться. Landsat 9 створює близько 700 знімків на добу, які доступні для користувачів через відкриті платформи USGS EarthExplorer, NASA GloVis та LandsatLook. Sentinel-2, представлений двома апаратами — 2A та 2B, — забезпечує близько 1500 знімків щоденно, а їхній доступ забезпечується сервісами Copernicus Open Access Hub, ESA SciHub та низкою хмарних інфраструктур.

Стратегічні переваги кожної із платформ визначають їхню роль у різних дослідницьких і практичних напрямках. Landsat 9 має особливе значення для довготривалого моніторингу Землі, зокрема завдяки можливості отримувати теплові знімки, що дозволяють аналізувати температурні аномалії, посухи, зміни теплообміну й інші явища, пов'язані з гідротермічним режимом поверхні. Sentinel-2, завдяки високій частоті повторних зйомок та великій ширині смуги покриття, дає змогу оперативно оцінювати зміни у сільському господарстві, лісових екосистемах, стані водних ресурсів і процесів землекористування.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що Landsat 9 та Sentinel-2 не конкурують, а взаємно підсилюють одне одного, формуючи комплексну інформаційну основу для дослідження навколишнього середовища. Landsat 9 забезпечує точне та стабільне багаторічне картографування повільних змін, тоді як Sentinel-2 дозволяє оперативно фіксувати швидкі й сезонні процеси. Взаємодоповнювальне використання цих даних підвищує якість екологічних оцінок, сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень і розширює можливості вивчення глобальних природних та антропогенних змін.

1.3 Дистанційне зондування Землі у вивченні змін землекористування

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) сьогодні є одним з основних джерел інформації для дослідження просторово-часових трансформацій земної поверхні. У контексті аналізу землекористування супутникові дані забезпечують унікальну можливість отримувати регулярні, просторово

узгоджені та високоточні спостереження за великими територіями, що дозволяє виявляти зміни різного характеру — від антропогенних процесів до природних динамічних явищ. У сучасних умовах інтенсивного освоєння територій, урбанізації, посилення агровиробництва та деградації природних ландшафтів ДЗЗ набуває особливої ваги як науковий інструмент для об'єктивного й систематичного моніторингу землекористування.

Землекористування охоплює форми і способи використання території людиною: сільське господарство, лісове господарство, урбанізація, промислове освоєння, рекреація, транспортна інфраструктура тощо. Структурні зміни у землекористуванні відображають трансформацію природних ландшафтів під впливом соціально-економічних, демографічних, екологічних та політичних факторів. Вивчення змін землекористування має особливе значення для:

- оцінки стійкості природних екосистем;
- моделювання кліматичних процесів;
- прогнозування деградаційних явищ (опустелювання, ерозія, зниження біорізноманіття);
- планування сталого землекористування;
- раціонального використання земельних ресурсів.

Традиційні методи — польові спостереження, кадастрові описи, статистичні дані — не завжди відображають повну картину стану землекористування. Їх обмежує точковість, періодичність, висока вартість та неможливість охоплення великих територій. На відміну від цього, системи дистанційного зондування забезпечують повторюваність зйомки, охоплення масштабних земельних масивів та об'єктивність вимірювання.

Використання дистанційного зондування Землі у дослідженнях землекористування ґрунтується на здатності супутникових сенсорів реєструвати спектральні характеристики поверхні у різних діапазонах електромагнітного спектра. Кожен тип земного покриття — рілля, ліс, водойми, забудова — має свій спектральний образ, що дозволяє виконувати класифікацію та диференціацію об'єктів на зображенні.

Основні переваги ДЗЗ у аналізі землекористування:

1. Регулярність та оперативність: супутникові системи Sentinel-2, Landsat 8/9 та інші забезпечують повторюваність від 2 до 16 днів, що дозволяє відстежувати сезонні та річні процеси.
2. Широке охоплення території: одна сцена може покривати сотні кілометрів (наприклад, Sentinel-2 охоплює смугу 290 км).
3. Історичні архіви даних: особливо цінним є архів Landsat, що надає послідовні дані з 1972 року, дозволяючи аналізувати зміни у довгостроковій перспективі.
4. Об'єктивність та незалежність: супутникові дані не залежать від людського фактора, формуючи точне відображення реального стану території.
5. Можливість автоматизації аналізу: алгоритми машинного навчання, нейронних мереж і Big Data-технологій значно пришвидшують процес інтерпретації даних.

Ці переваги визначають широке застосування ДЗЗ у сфері моніторингу землекористування, що сьогодні є одним із ключових напрямів екологічних, географічних та землевпорядних досліджень.

Виявлення змін землекористування ґрунтується на аналізі відбивальних характеристик різних типів поверхонь у спектральних діапазонах. Для цього у супутниковій зйомці найважливішими є:

- видимий спектр (RGB) — дозволяє виявити загальні особливості поверхні;
- NIR (ближній інфрачервоний) — чутливий до фотосинтетичної активності рослинності;
- SWIR (короткохвильовий інфрачервоний) — до вологовмісту ґрунту та рослинності;
- Red Edge — до структурних характеристик рослинності;
- TIRS (тепловий діапазон, для Landsat) — визначає температурні властивості поверхні.

Різні комбінації цих діапазонів дозволяють будувати тематичні композиції, які підсилюють ознаки певних об'єктів: водні поверхні, забудова, лісові масиви, сільськогосподарські угіддя тощо.

Таблиця 1.2

Спектральні ознаки та характеристика основних типів землекористування»

Тип землекористування	Опис	Спектральні ознаки
Лісові масиви	Природні та штучні ліси	Високий NIR, середній SWIR
Орні землі	Сільськогосподарські угіддя	Високий NDVI у сезон зростання
Міські території	Забудова, інфраструктура	Високий NDBI, низький NDVI

Одним із ключових методів аналізу змін землекористування є використання індексів, які формуються шляхом математичних операцій над спектральними каналами. Найпоширенішим є NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який відображає інтенсивність фотосинтезу та використовується для:

- визначення меж сільськогосподарських угідь;
- оцінки стану лісів;
- моніторингу деградації земель;
- аналізу змін у рослинному покриві.

Інші індекси використовуються для конкретних задач:

- NDBI — для виявлення забудови;
- NDWI — для оцінки водних об'єктів;
- BAI та NBR — для аналізу наслідків пожеж;
- EVI — для точнішого визначення стану рослинності у густих екосистемах.

Таким чином, індексний аналіз дозволяє отримувати кількісні показники, необхідні для об'єктивної оцінки змін землекористування.

Методи класифікації земного покриття

Класифікація є центральним етапом у дослідженні змін землекористування. Сучасні методи включають:

- некеровану класифікацію (K-means, ISODATA), яка виявляє природні спектральні кластери;
- керовану класифікацію (Maximum Likelihood, Random Forest, SVM), яка використовує навчальні вибірки;
- об'єктно-орієнтований аналіз (OBIA), що враховує не лише спектральні, а й просторові та структурні характеристики.

Порівняння даних за різні часові періоди (change detection) дає змогу оцінити:

- зміни у площах сільськогосподарських земель;
- темпи урбанізації;
- динаміку лісового покриття;
- процеси деградації або відновлення природних територій.

Використання супутників Sentinel і Landsat у дослідженні змін землекористування

Платформи Sentinel та Landsat є сьогодні основними інструментами моніторингу землекористування. Sentinel-2 забезпечує високу просторову роздільність (10 м) та частоту зйомки (5 днів), що оптимально для виявлення швидких змін. Landsat 9, попри меншу частоту оновлення (16 днів), має перевагу у радіометричній глибині (14 біт) та теплових каналах, що дозволяє аналізувати температурні зміни поверхні, які нерідко слугують індикаторами змін у землекористуванні.

Поєднання цих джерел створює потужну основу для комплексного моніторингу, де Sentinel-2 використовується для оперативної оцінки, а Landsat — для довгострокових історичних аналізів.

Значення дистанційного зондування у забезпеченні сталого управління територіями

Систематичний моніторинг землекористування за даними ДЗЗ є ключовим інструментом для:

- екологічного планування (оцінка природних ресурсів, попередження деградації);
- містобудування (контроль розширення забудови, аналіз просторових структур міст);
- аграрного менеджменту (оптимізація землеробства, оцінка впливу кліматичних ризиків);
- лісового господарства (контроль вирубок, відновлення лісів);
- водного господарства (зміни прибережних територій, підтоплення, меліорація).

Сучасні супутникові технології дозволяють приймати обґрунтовані рішення, спрямовані на збалансований розвиток, охорону довкілля та запобігання негативним антропогенним наслідкам.

Дистанційне зондування Землі є незамінною технологією у вивченні змін землекористування. Його значення визначається здатністю забезпечувати масштабне, об'єктивне та регулярне спостереження за територіями у різний час і з високою точністю. Використання супутникових даних Sentinel та Landsat формує надійну інформаційну основу для аналізу як короткострокових, так і довготривалих динамічних процесів. Завдяки цьому ДЗЗ відіграє ключову роль у розробленні стратегій сталого управління земельними ресурсами, підтримці екологічної рівноваги та прийнятті управлінських рішень у природоохоронній, аграрній та урбаністичній сферах.

РОЗДІЛ 2. ВИХІДНІ ДАНІ, МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика супутникових даних Sentinel-2 та Landsat 8/9

Супутникові системи Sentinel-2 та Landsat 8/9 є одними з найважливіших та найбільш поширених джерел даних дистанційного зондування Землі. Вони забезпечують високоякісні мультиспектральні зображення, що застосовуються для аналізу стану земельних ресурсів, екологічного моніторингу, картографування, прогнозування динаміки природних процесів і підтримки прийняття рішень у сфері природокористування. Незважаючи на спільне призначення — дослідження земної поверхні, — платформи Sentinel-2 та Landsat 8/9 мають низку специфічних особливостей, які визначають їхні технічні, спектральні, радіометричні та операційні характеристики. Вивчення їхніх параметрів є необхідною умовою для коректного вибору супутникових даних відповідно до завдань дослідження.

Програма Sentinel-2 є частиною європейської системи моніторингу навколишнього середовища Copernicus, яка створена з метою забезпечення безперебійного доступу до просторових даних для моніторингу екосистем, сільського господарства, лісів, поверхневих вод, атмосферних процесів та управління ризиками природних катастроф. Супутники Sentinel-2A та Sentinel-2B працюють на сонячно-синхронній орбіті на висоті 786 км і забезпечують глобальне покриття з інтервалом повторення приблизно 5 днів. Головною особливістю місії є її мультиспектральний сенсор MSI (Multispectral Instrument), який охоплює 13 спектральних каналів у видимому, ближньому та короткохвильовому інфрачервоних діапазонах.

Супутники Landsat 8 та Landsat 9 продовжують найтривалішу в історії програму дистанційного зондування Землі, що розпочалася у 1972 році. Програма реалізується NASA спільно з Геологічною службою США (USGS) і має стратегічне значення для формування архіву глобальних змін земної поверхні. Landsat 8 і 9 оснащені двома основними сенсорами: OLI (Operational Land Imager), який забезпечує мультиспектральні знімки у видимому, NIR і SWIR діапазонах, та TIRS (Thermal Infrared Sensor), що забезпечує теплову

інформацію, котра відсутня у Sentinel-2. Період повторення сцени кожним супутником становить 16 днів, а разом — 8 днів, що істотно підвищує часову доступність даних.

Спектральна роздільність є однією з ключових характеристик супутникових знімків, оскільки вона визначає здатність сенсора розрізняти різні типи об'єктів на земній поверхні за їхнім спектральним відгуком. Sentinel-2 має 13 каналів у діапазоні 443–2190 нм. Три канали охоплюють видиму частину спектра, чотири — ближній інфрачервоний, а шість — короткохвильову ІЧ-область. Важливою особливістю Sentinel-2 є наявність чотирьох каналів у зоні red-edge, що надзвичайно чутливі до хлорофільного вмісту та структурного стану рослинності. Саме тому Sentinel-2 широко використовується в аграрному моніторингу, лісовій інвентаризації та екологічних оцінках.

Landsat 8/9 має 11 каналів, серед яких дев'ять мультиспектральних каналів OLI та два теплових канали TIRS. Хоча кількість спектральних каналів у Landsat менша, порівняно з Sentinel-2, сенсор має ключову перевагу — теплові канали TIRS, які дають змогу визначати температуру поверхні ґрунту, оцінювати теплозабезпечення територій, виявляти посухи, теплові аномалії, змінюваність водного режиму та інші гідротермічні процеси. Таким чином, кожна платформа має власну унікальність: Sentinel-2 характеризується підвищеною спектральною чутливістю до рослинності, а Landsat 8/9 — до температурних властивостей земної поверхні.

Просторова роздільність визначає розмір найменшого об'єкта, який може бути розпізнаний на зображенні. Sentinel-2 забезпечує просторову роздільність 10, 20 та 60 метрів залежно від спектрального каналу. Основні видимі канали та NIR мають роздільність 10 метрів, що дозволяє отримувати високу деталізацію ландшафтних структур, меж полів, водних об'єктів та антропогенних елементів. Канали SWIR та red-edge мають роздільність 20 метрів, що є оптимальним для аналізу рослинності та ґрунтів.

Landsat 8/9 забезпечує роздільність 30 метрів для більшості мультиспектральних каналів, 15 метрів — для панхроматичного каналу, та 100 метрів — для теплових каналів (перерахованих до 30 м після ресемплінгу). Таким чином, Landsat забезпечує стабільну середню просторову роздільність, яка є достатньою для регіональних досліджень і аналізу довготривалих змін, хоча і поступається Sentinel-2 у рівні деталізації дрібних об'єктів.

Просторова роздільність впливає на точність картографування та розпізнавання об'єктів. Sentinel-2 краще підходить для детального аналізу малих територій та аграрних угідь, тоді як Landsat забезпечує стабільні дані для регіональних і глобальних порівняльних оцінок.

Часова роздільність є критичним фактором у моніторингу земної поверхні, особливо для досліджень швидких змін, таких як ріст рослинності, сільськогосподарські цикли, пожежі, повені та урбанізація. Sentinel-2A і Sentinel-2B у парі забезпечують повторне знімання однієї й тієї самої території кожні 5 днів. Завдяки цьому дослідники мають змогу отримувати актуальні дані, незалежні від сезонних змін та хмарності.

У Landsat 8 та Landsat 9 період повторення становить 16 днів для кожного апарата, але сумарно — 8 днів. Цього достатньо для моніторингу середньострокових процесів, але недостатньо для надзвичайно швидких змін. Проте саме довгостроковість архіву Landsat (50 років) робить його незамінним для аналізу багаторічних тенденцій.

Радіометрична роздільність визначає здатність сенсора розпізнавати тонкі відмінності у яскравості пікселів. Sentinel-2 забезпечує 12-бітну глибину, що відповідає 4096 рівням яскравості. Цього достатньо для більшості екологічних, агрономічних та картографічних задач.

Landsat 8/9, натомість, має 14-бітну радіометричну глибину, яка містить 16 384 рівні відбиття. Завдяки цьому знімки Landsat мають вищу точність передавання спектральної інформації, що особливо важливо для довготривалих екологічних досліджень, аналізу деградаційних процесів, температурного моделювання та задач змішаної класифікації.

Супутникові системи Landsat та Sentinel функціонують на основі відкритого доступу до даних. Sentinel-2 продукує близько 1500 знімків на добу, Landsat 8/9 — близько 700. Дані обох місій доступні безкоштовно через:

- Copernicus Open Access Hub;
- NASA EarthExplorer;
- Google Earth Engine;
- AWS Open Data.

Відкритість даних є важливим фактором у розвитку науки, оскільки забезпечує доступ до спостережень для широкого кола користувачів.

Характеристика супутникових даних Sentinel-2 та Landsat 8/9 свідчить, що обидві місії є взаємодоповнювальними інструментами для аналізу земної поверхні. Sentinel-2 забезпечує високу просторову та часову роздільність, що робить його оптимальним для дослідження швидких змін. Landsat 8/9 вирізняється тривалістю архіву, наявністю теплових каналів та вищою радіометричною точністю, що є надзвичайно важливим для довготривалих досліджень. Використання цих двох джерел у комплексі дає змогу отримувати найбільш точні, інформативні та об'єктивні результати, необхідні для сталого управління природними ресурсами.

2.2 Методи класифікації земного покриття

Класифікація земного покриття є одним із фундаментальних напрямів аналізу супутникових зображень, що використовується для створення тематичних карт, оцінки стану природних ресурсів та виявлення просторово-часових змін у ландшафтах. Вона полягає у віднесенні кожного пікселя або об'єкта зображення до певної категорії поверхні на підставі його спектральних, текстурних чи структурних характеристик. Оскільки різні типи земного покриття по-різному відбивають електромагнітне випромінювання, спектральні відмінності стають основою для автоматизованого розпізнавання об'єктів на супутникових знімках. Сучасні алгоритми класифікації охоплюють широкий спектр методів — від базових статистичних підходів до складних моделей

машинного навчання, що відкриває можливості для високоточної інтерпретації великих масивів даних дистанційного зондування Землі.

Некеровані методи класифікації засновані на математичних алгоритмах групування даних без попередньо визначених зразків. Вони дозволяють виявляти природні спектральні кластери, тобто групи пікселів, які мають схожі відбивальні властивості. Найчастіше використовують алгоритм K-means, який розподіляє зображення на кластери, мінімізуючи відстань між пікселем і центром групи, а також алгоритм ISODATA, що автоматично об'єднує або розділяє кластери відповідно до статистичних критеріїв. Такі методи забезпечують загальне уявлення про структуру території та широко застосовуються на початкових етапах дослідження, коли відсутня точна інформація про класи або коли потрібно швидко виконати попереднє картографування. Проте їхня точність значною мірою залежить від спектральної однорідності території, що обмежує застосування некерованої класифікації у складних ландшафтах.

Керовані методи класифікації ґрунтуються на використанні навчальних вибірок, що представляють кожен клас земного покриття. Ці вибірки закладають основу алгоритму, який формує статистичні або математичні моделі для визначення спектральних ознак кожного класу. Одним із найдавніших і найпоширеніших є метод максимального правдоподібності, який порівнює спектральну характеристику пікселя з ймовірнісними моделями класів та відносить піксель до того класу, для якого ймовірність є максимальною. Хоча цей метод є точним за умови правильного добору навчальних зразків, він чутливий до статистичних відхилень та вимагає нормального розподілу спектральних значень.

Широке застосування у класифікації земного покриття набули методи машинного навчання, зокрема алгоритм Random Forest та підтримувальні векторні машини (SVM). Random Forest створює велику кількість дерев рішень і визначає клас шляхом голосування, що робить модель стійкою до шумів і забезпечує високу точність для різноманітних типів поверхні. Алгоритм SVM

формує межу розділення у багатовимірному просторі, що дає змогу ефективно класифікувати нелінійні та спектрально складні дані навіть за невеликих наборів навчальних зразків. Ці моделі значною мірою підвищили ефективність класифікації, особливо на територіях зі складною структурою земного покриття.

Подальшим етапом розвитку методів класифікації стали нейронні мережі, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), що застосовуються для аналізу зображень високої роздільної здатності. Нейронні мережі можуть автоматично виділяти ознаки, важливі для розпізнавання об'єктів, а також враховувати текстурні особливості, форму об'єктів, контекст і просторові зв'язки. Це робить їх одним із найефективніших інструментів для класифікації земного покриття в умовах урбанізованих територій, складних природних ландшафтів або дрібних аграрних об'єктів. Проте їх використання потребує значних обчислювальних ресурсів і великих навчальних вибірок, що не завжди є можливим.

Суттєво інший підхід до класифікації земного покриття пропонує об'єктно-орієнтований аналіз, у якому одиницею класифікації виступає не окремий піксель, а сегмент — об'єкт, сформований на основі подібності спектральних і геометричних властивостей. Сегментація ділить зображення на однорідні області за текстурою, формою та положенням у просторі, після чого кожен сегмент класифікується як єдине ціле. На відміну від піксельного аналізу, об'єктно-орієнтований підхід дає можливість точніше визначати межі об'єктів і зменшувати шум, що робить його надзвичайно ефективним для високодетальних знімків та міських досліджень. Він широко застосовується у кадастрових роботах, лісовому менеджменті, аналізі берегових ліній та ідентифікації штучних об'єктів. Проте точність сегментації значною мірою залежить від параметрів алгоритму, і помилки на стадії сегментації можуть поширюватися на всю класифікацію.

У дослідженнях динаміки земного покриття важливу роль відіграють методи визначення змін, або Change Detection. Вони ґрунтуються на порівнянні даних за різні проміжки часу і дозволяють виявити та кількісно оцінити зміни у землекористуванні. Найпростіші методи включають порівняння класифікацій

для різних років або аналіз різниці спектральних індексів, таких як NDVI, NDBI або NDWI. Більш складні підходи використовують багаточасові моделі машинного навчання або статистичні методи аналізу трендів, що дозволяє визначати не лише факт змін, але й їхню напрямленість та інтенсивність. Ці методи надзвичайно важливі для оцінки урбанізації, аграрних трансформацій, лісових вирубок, динаміки водних ресурсів та процесів деградації земель.

Вибір методу класифікації залежить від багатьох факторів, серед яких характеристики супутникового знімка, гетерогенність території, наявність навчальних даних, масштаб дослідження та цілі аналізу. Часто найбільш ефективним є комбінування різних підходів, що дає змогу поєднати переваги статистичних, спектральних та об'єктних методів. Унаслідок цього формуються детальніші та точніші тематичні карти, що забезпечують високу інформативність як для наукових, так і для прикладних завдань.

Таким чином, класифікація земного покриття є важливим інструментом дистанційного зондування Землі, який забезпечує високий рівень аналітичної точності та дозволяє глибоко вивчати природні й антропогенні процеси. Розвиток методів машинного навчання, удосконалення супутникових сенсорів та збільшення доступності високоякісних даних сприяють удосконаленню класифікаційних алгоритмів і розширюють можливості дослідження земної поверхні в умовах сучасних глобальних викликів.

2.3 Технологічні засоби аналізу (QGIS, ArcGIS, Google Earth Engine)

У сучасній практиці дистанційного зондування Землі аналіз супутникових даних неможливий без потужних геоінформаційних систем (ГІС) та платформ обробки великих масивів просторової інформації. До найбільш ефективних інструментів, що застосовуються для обробки, візуалізації та інтерпретації супутникових даних Sentinel та Landsat, належать QGIS, ArcGIS та Google Earth Engine. Кожен із цих програмних продуктів має унікальні можливості, що визначають сферу їхнього використання в екологічних, картографічних, геоінформаційних та землевпорядних дослідженнях.

QGIS є одним із найпоширеніших інструментів, що використовується для обробки растрових і векторних даних у відкритому програмному середовищі. Його перевага полягає у відкритості вихідного коду, що дозволяє користувачам адаптувати програму для конкретних завдань та інтегрувати власні модулі й скрипти. QGIS підтримує широкий спектр форматів супутникових знімків і містить значну кількість інструментів для обробки даних: радіометричної та атмосферної корекції, фільтрації шумів, побудови індексних карт, виконання класифікації та сегментації. Підтримка плагінів, таких як Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), значно спрощує процес завантаження знімків Sentinel і Landsat, їхньої попередньої обробки та виконання супутникового аналізу. SCP дозволяє користувачеві автоматично виконувати атмосферну корекцію, обчислювати індекси рослинності, будувати спектральні профілі, а також проводити керовану та некеровану класифікацію. Це робить QGIS доступним, функціональним та ефективним інструментом навіть для дослідників, які працюють із великими масивами супутникової інформації, не маючи доступу до комерційних програмних продуктів.

ArcGIS, розроблений компанією Esri, є комплексною і найбільш технічно розвиненою платформою для геоінформаційного аналізу. На відміну від QGIS, ArcGIS пропонує інтегроване середовище з широким набором професійних інструментів для обробки растрових даних, просторової аналітики, 3D-моделювання та побудови карт високої якості. Модуль Spatial Analyst забезпечує можливості для детального аналізу спектральних характеристик, класифікації земного покриття, інтерполяції, моделювання рельєфу та аналізу просторових закономірностей. Крім того, ArcGIS Pro має вдосконалені алгоритми класифікації, включно з машинним навчанням, підтримує роботу з великими геопросторовими даними та забезпечує інтеграцію з хмарними сервісами ArcGIS Online. Однією з ключових переваг ArcGIS є висока точність геообробки та можливість створення складних моделей аналізу, що робить його незамінним інструментом у проєктуванні, плануванні територій,

природокористуванні та геоінформаційних дослідженнях, які потребують високої надійності результатів.

Google Earth Engine (GEE) є революційною хмарною платформою обробки супутникових даних, що поєднує у собі масштабованість серверних систем і доступ до одного з найбільших у світі архівів супутникових знімків. На відміну від локальних ГІС-систем, GEE дозволяє працювати з петабайтами даних без необхідності завантаження знімків на комп'ютер. Користувач взаємодіє з платформою через скриптове середовище, що дає змогу виконувати складні операції — фільтрацію, композитування, класифікацію, аналіз часових рядів та виявлення змін — у режимі реального часу. Особливо ефективним GEE є для роботи з довготривалими супутниковими архівами, зокрема Landsat і Sentinel, що дозволяє дослідникам виконувати автоматизований аналіз великих територій і виконувати моніторинг змін землекористування за десятиліття. Платформа підтримує машинне навчання, включно з класифікацією на основі Random Forest, SVM та нейронних мереж, що значно підвищує точність автоматизованого аналізу. Крім того, GEE дозволяє оперативно будувати складні композити, такі як «median composites», «cloud-free mosaics», та працювати з екологічними індексами для великих часових масштабів.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що QGIS, ArcGIS і Google Earth Engine є трьома ключовими інструментами сучасного супутникового аналізу, які доповнюють одне одного та дозволяють обирати оптимальну технологічну платформу відповідно до цілей дослідження. QGIS забезпечує гнучкість і доступність, ArcGIS — професійну точність і комплексність, тоді як GEE — швидкість і масштабованість хмарних обчислень. Використання цих платформ у взаємодії дає можливість проводити повний цикл обробки супутникових даних: від завантаження та передобробки до складного просторово-часового аналізу та побудови високоточних тематичних карт. Саме ці технологічні інструменти формують основу сучасних методів аналізу змін земного покриття та забезпечують якісний прорив у галузях природокористування, екологічного моніторингу, просторового планування та наукових досліджень.

За особливостями організації обробки даних, операції цієї групи можна розбити на декілька типів. До першого типу відносяться модифікації значень кожного окремого пікселя, які виконуються, як правило, із використанням табличного способу представлення перетворюючої функції (таблиця перекодування). Різні види лінійного та нелінійного контрастування, призначені для покращення візуального сприйняття зображень, є характерними представниками даних перетворень. Другий тип – це локальні операції, особливістю яких є модифікація значення кожного елементу зображення із використанням значень сусідніх пікселів у якій-небудь обмеженій (локальній) області. Типовими перетвореннями цього виду є операції фільтрування зображень. Згладжувальні, або низькочастотні, фільтри дозволяють зняти шум та видалити малі деталі. Це дозволяє отримати більш однорідні ділянки зображення, придатні для подальшої обробки із метою виявлення певних об'єктів. Високочастотні фільтри призначені для виділення або підкреслення перепадів значень пікселів, що використовується при пошуку на зображенні границь об'єктів та виявленні різних структур, які проявляються у вигляді зсуву або перепаду значень елементів зображення. До групи операцій перетворення геометричних характеристик зображень відносяться: – монтування зображень із окремих фотографій або їх фрагментів; – вирізання потрібного фрагменту; – компресія зображення або його розтяг; – трансформація зображення в яку-небудь картографічну проекцію. Третій вид операцій призначений для створення різних кольорових композицій, оптимальних для візуального сприйняття. Ця група перетворень дозволяє отримати кольорові зображення у віртуальних умовних та псевдокольорах, що є одним із способів обробки багатомірних зображень.

Головними цілями геообробки є надання інструментів та основ виконання геоінформаційного аналізу та управління географічними даними. Можливості моделювання та аналізу, які надає геообробка, роблять ArcGIS повноцінною геоінформаційною системою [11]. Геообробка включає багато інструментів для вирішення геоінформаційних задач, починаючи від простої побудови буфера та

накладення полігонів до комплексного регресійного аналізу та класифікації зображень. Багато із задач, які необхідно автоматизувати, можуть бути 98 звичайними, наприклад, перетворити групи даних з одного формату в інший, або задачі, які можуть бути дуже креативними, вирішення яких вимагає послідовності операцій моделювання та аналізу комплексних просторових відношень, наприклад: – розрахунок оптимальних маршрутів через транспортну мережу; – прогнозування поширення природних пожеж; – аналіз та знаходження закономірностей; – визначення територій, схильних до зсувів; – прогноз повені внаслідок злив. Геообробка базується на загальному середовищі перетворення даних. Стандартний інструмент геообробки здійснює операції з набором даних ArcGIS та створює новий набір даних як результат роботи інструменту. Кожен інструмент геообробки виконує невелику, але важливу операцію з географічними даними. Геообробка дозволяє складати ланцюжки інструментів, коли заключні дані попереднього інструменту є вихідними для наступного, тому можна використовувати цю можливість для формування необмеженого числа моделей геообробки (послідовність застосування інструментів), які допоможуть автоматизувати роботу та вирішити складні проблеми. Геостатистика – це розділ статистики, який займається аналізом та прогнозуванням значень, пов’язаних з просторовими та просторово-часовими явищами. Згодом такі інструменти та методи розвинулися і тепер надають не тільки інтерпольовані значення, але і міри невизначеності для таких значень. Вимірювання невизначеності важливо для обґрунтованого прийняття рішень, оскільки вона надає відомості про можливі значення (результати) для всіх місць розташування, а не тільки для одного проінтерпольованого значення. Геостатистичний аналіз також пройшов шлях від одновимірного до багатовимірного і сьогодні пропонує механізми, що враховують допоміжні набори даних, які доповнюють основні змінні, дозволяючи створювати більш точні моделі інтерполяції та невизначеності.

3.МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ЗМІН ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ

3.1. Характеристика території дослідження

Івано-Франківська область є одним із найрізноманітніших за природними умовами регіонів України, що зумовлює складну структуру земного покриву та особливості його просторово-часової динаміки. Територія області, розташованої у межах Західної України, охоплює площу близько 13,9 тис. км² і характеризується поєднанням гірських, передгірських та рівнинних ландшафтів. Складність морфологічної структури та виражена вертикальна поясність створюють значні контрасти в розподілі природних ресурсів, густині населення, інтенсивності землекористування та антропогенному навантаженні.

Рельєф області визначається наявністю трьох основних геоморфологічних зон: гірської частини Українських Карпат, передкарпатських височин та Придністровської рівнини. Гірські масиви — зокрема Горгани, Покутсько-Буковинські Карпати та Чорногірський хребет — займають понад 40 % території та характеризуються глибоко розчленованим рельєфом, значними перепадами висот і високою лісистістю. Саме в межах області розташована найвища вершина України — гора Говерла (2061 м), що формує унікальні природні комплекси та складні умови для обробки супутникових знімків через тіньовий ефект і неоднорідність поверхні.

Кліматичні умови області формуються під впливом помірно континентальних повітряних мас, у поєднанні з орографічними особливостями. Середньорічна температура на рівнинах сягає +7...+9 °С, тоді як у високогірних районах знижується до +2...+4 °С. Кількість опадів варіює від 600–800 мм на рівнинній частині до 1600 мм у Карпатах, що призводить до підвищеної хмарності й ускладнює отримання безхмарних супутникових сцен, особливо у період активної вегетації. Ці кліматичні чинники мають важливе значення при плануванні аналізу супутникових даних Sentinel-2 та Landsat 8/9, адже вони впливають на частоту доступних для аналізу знімків.

Гідрографічна мережа регіону розвинена, що зумовлено гірським рельєфом та значною кількістю атмосферних опадів. Основними водними артеріями є річки Дністер, Прут, Бистриця Солотвинська та Бистриця Надвірнянська. У гірських районах спостерігається висока динаміка руслових процесів, часті паводки та зміни заплав, що добре фіксується за супутниковими індексами водності — NDWI, MNDWI — і є важливим аспектом моніторингу землекористування.

Структура землекористування Івано-Франківської області вирізняється значною строкатістю. Ліси займають близько 40 % території, переважно у гірських районах, і представлені хвойними, мішаними та буковими насадженнями. Сільськогосподарські землі становлять близько 45 % території й переважають у рівнинних районах, особливо в околицях міст Коломия, Тисмениця, Городенка. Урбанізовані території займають близько 8–10 %, найбільше зосереджені навколо Івано-Франківська, Калуша та Коломій. Промислові комплекси, зокрема техногенно змінені території Калуського промвузла, формують окремі категорії земного покриття, що характеризуються специфічними спектральними ознаками й потребують особливого підходу до супутникового аналізу.

Особливе значення в структурі земнокористування мають природоохоронні території. На території області функціонує Карпатський національний природний парк, низка лісових заказників та природних заповідних урочищ. Вони потребують систематичного моніторингу стану лісів, виявлення зсувів, буреломів, слідів несанкціонованих рубок, що робить супутникові дані важливим інструментом екологічного контролю.

Таким чином, Івано-Франківська область є територією з високим різноманіттям природних умов та складною системою землекористування. Це створює широкі можливості для застосування методів дистанційного зондування, а супутникові дані Sentinel-2 і Landsat 8/9 забезпечують достатню просторову, спектральну та часову роздільність для виконання детального аналізу змін земного покриття, оцінювання аграрних тенденцій, лісових динамік і урбанізаційних процесів. В

таблиці 3.1 показано Фізико-географічні характеристики Івано-Франківської області

Таблиця 3.1

Фізико-географічні характеристики Івано-Франківської області

Показник	Характеристика
Площа області	13 900 км ²
Геоморфологічні зони	Карпати, Передкарпаття, Придністровська височина
Найвища точка	Гора Говерла (2061 м)
Тип рельєфу	Гірський, передгірський, рівнинний
Середньорічна температура	+7...+9 °С (рівнини), +2...+4 °С (гори)
Кількість опадів	600–800 мм (рівнини), 1400–1600 мм (гори)
Основні річки	Дністер, Прут, Бистриця Надвірнянська, Бистриця Солотвинська
Рівень лісистості	≈ 40 %
Хмарність	Висока, особливо в гірських районах

Таблиця 3.2

Структура землекористування Івано-Франківської області

Тип землекористування	Частка території	Характеристика
Ліси	~40 %	Хвойні, мішані, букові ліси; переважно гірські райони
Сільськогосподарські землі	~45 %	Орні землі, сіножаті, пасовища
Урбанізовані території	8–10 %	Міська забудова, промислові зони
Водні об'єкти	~2 %	Річки, водосховища, ставки
Природоохоронні території	~13 %	Карпатський НПП, заказники, урочища

Природно-ландшафтна мозаїчність Івано-Франківської області зумовлює складну просторову структуру земного покриву, що є важливим чинником під час аналізу території за даними дистанційного зондування. Значні контрасти в рельєфі, кліматі та землекористуванні формують різні спектральні характеристики поверхні, що проявляються у супутникових зображеннях Sentinel-2 та Landsat 8/9. Ці відмінності особливо помітні при вивченні територій гірського Карпатського регіону, де спостерігається чергування лісових масивів, відкритих гірських лук, пасовищ, кам'янистих ділянок та зсувних схилів. У таких умовах традиційні методи польового обстеження є надзвичайно трудомісткими, тому супутниковий моніторинг набуває ключового значення.

Важливою особливістю області є наявність високо змінних сезонних процесів, зокрема контрастної динаміки снігового покриву. У горах сніг може зберігатися до травня, що впливає на вибір часових інтервалів для аналізу знімків та потребує застосування індексів, чутливих до снігу, таких як NDSI. Ці сезонні особливості суттєво впливають на алгоритми класифікації земного покриву, оскільки наявність снігу, тіней та часта хмарність знижують точність розпізнавання об'єктів. Для мінімізації цих ефектів важливо формувати безхмарні композити або застосовувати багатотемпоральний аналіз.

У рівнинно-передгірській частині області, де переважають сільськогосподарські угіддя, динаміка землекористування підпорядковується аграрним циклам. Сезонні фази росту культур (посів, сході, вегетація, збирання урожаю) створюють характерні спектральні сигнали, що відображаються у NDVI, EVI та інших індексах рослинності. Це дозволяє досліджувати просторову неоднорідність аграрних угідь, стан рослинності, рівень деградації ґрунтів та зміни у структурі землекористування внаслідок інтенсифікації сільського господарства.

У контексті урбанізованих територій Івано-Франківської області важливу роль відіграють міста Івано-Франківськ і Калуш — найбільш динамічні щодо розширення забудови. Урбанізаційні процеси призводять до перетворення

сільськогосподарських земель на житлові та промислові масиви, змін структури ґрунтового покриву та підвищення техногенного навантаження. Супутникові дані дозволяють простежувати ці трансформації за допомогою індексів штучних поверхонь (NDBI), аналізу теплових аномалій, визначення теплових «островів» та порівняння багаточасових сцен. Особливо показовим є використання часових рядів Landsat для оцінювання багаторічної динаміки урбанізації, яка може бути непомітною при застосуванні тільки сучасних знімків високої роздільності.

Лісові масиви, що домінують у гірській частині регіону, перебувають під впливом як природних, так і антропогенних чинників. Тут поширені буреломи, зсуви, ерозійні процеси, а також епізодичні незаконні вирубки, які ускладнюють управління лісовими ресурсами. Супутникові технології дозволяють оперативно виявляти осередки вирубок, контролювати масштаби лісових втрат та аналізувати зміни густоти рослинного покриву. Використання індексів NBR, dNBR та індикаторів постпожежного впливу створює можливість для детального вивчення наслідків стихійних явищ та антропогенних втручань.

Особливу увагу привертають природоохоронні території, які виступають чутливими індикаторами екологічного стану Карпатського регіону. Вони потребують точного та систематичного моніторингу для виявлення порушень та оцінювання стану екосистем. Супутникові дані дозволяють аналізувати не лише зміни у лісовому покриві, але й динаміку високогірних лук (полонин), заболочених ділянок та руслових процесів річок, що особливо важливо в умовах глобальних кліматичних змін.

Узагальнюючи, Івано-Франківська область є надзвичайно перспективним регіоном для апробації сучасних методів аналізу супутникових даних, оскільки тут поєднуються різноманітні типи земного покриву, складні геоморфологічні умови та різноспрямовані процеси природного й антропогенного характеру. Це створює умови для комплексного застосування спектральних індексів, класифікаційних алгоритмів та багаточасових методів аналізу, що дозволяє

формувати достовірну картину змін землекористування та розробляти науково обґрунтовані рекомендації щодо управління ландшафтами області.

3.2 Процедура класифікації земного покриву за зображеннями Sentinel та Landsat

Класифікація земного покриву на основі супутникових зображень Sentinel та Landsat є ключовим етапом дистанційного зондування, який забезпечує отримання структурованої інформації про типи поверхні, їхній просторовий розподіл та зміни в часі. Процедура класифікації охоплює повний цикл обробки даних — від підготовки супутникових сцен і попередньої корекції до формування навчальних вибірок, вибору алгоритмів та оцінювання точності отриманих результатів. Висока якість класифікації є фундаментальною умовою для подальшого аналізу землекористування, моделювання екологічних процесів та моніторингу антропогенних трансформацій.

Першим етапом класифікації є відбір та підготовка супутникових даних. Знімки Sentinel-2 та Landsat 8/9 мають різні просторові і спектральні характеристики, що впливає на їхню придатність для різних завдань. Sentinel-2 забезпечує високу просторову роздільність (10–20 м) та короткий період повторення, що є особливо важливим для аналізу аграрних територій і динамічних процесів. Landsat, завдяки своїй 50-річній історичній серії даних та наявності теплових каналів, дозволяє виконувати довгострокові екологічні дослідження та аналіз змін поверхні у багаторічному циклі. Перед проведенням класифікації над знімками виконується радіометрична та атмосферна корекція, спрямована на усунення впливу атмосферних частинок, водяної пари та змін у куті освітлення. Зокрема, для Sentinel-2 широко застосовується алгоритм Sen2Cor, який перетворює дані до рівня BOA (Bottom-of-Atmosphere), тоді як для Landsat використовують LaSRC або традиційні методи Dark Object Subtraction. Виконання корекції є важливою умовою для коректного порівняння багаточасових знімків та підвищення надійності спектральної інформації.

Другим етапом є формування спектральних індикаторів, які покращують роздільність між різними типами земного покриву. Широко використовуються

індекси NDVI, EVI, NDWI, NBR, NDBI, що дозволяють виділяти рослинність, водні об'єкти, наслідки пожеж та штучні поверхні відповідно. Індекси підсилюють різницю між класами, роблячи процедуру класифікації більш точною, особливо коли спектральні характеристики окремих покривів є взаємно близькими. У випадку знімків Sentinel-2 важливу роль відіграють канали Red Edge, які дають змогу точніше розрізняти види та стан рослинності. Комбінація спектральних каналів і індексів створює оптимальний набір ознак, які надалі використовуються у класифікаційній моделі.

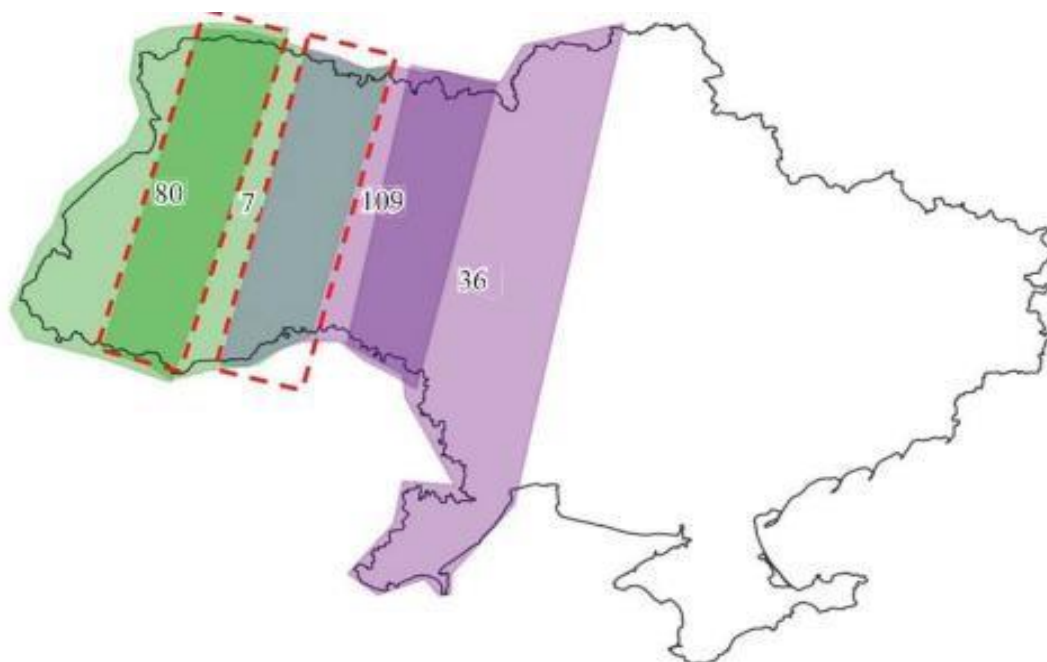


Рисунок 3.1 Територія Івано-Франківської області виділена смугами до траєкторії супутника Sentinel-2

Формування навчальних вибірок є ключовим етапом керованої класифікації. Навчальні ділянки повинні покривати усі класи земного покриву, бути спектрально однорідними, просторово репрезентативними та відібраними на основі достовірної інформації — польових даних, кадастрових карт або верифікованих ортофотопланів. У випадку гірських та мозаїчних територій додаткову увагу приділяють проблемам тіней, неоднорідної освітленості та змішаних пікселів. Застосування методів перевірки якості навчальних вибірок, наприклад, аналіз спектральних профілів та побудова діаграм розсіювання,

дозволяє мінімізувати похибки на ранніх стадіях та покращити точність кінцевої класифікації.

Вибір класифікаційного алгоритму визначає загальну точність та стійкість розпізнавання. Методи максимальної правдоподібності є класичними і широко застосовуються в екологічних та географічних дослідженнях, однак їхня ефективність знижується на складних ландшафтах. Значно кращі результати демонструють алгоритми машинного навчання, зокрема Random Forest та Support Vector Machine, які здатні моделювати нелінійні зв'язки у спектральних даних. Random Forest, завдяки ансамблю дерев рішень, забезпечує стійкість до шумів, варіативності даних та змішаних пікселів, що характерно для територій з мозаїчною структурою землекористування. Алгоритм SVM, своєю чергою, ефективно працює у багатовимірному просторі ознак та дозволяє розділяти класи з мінімальними перекриттями.

Після отримання класифікованого зображення виконується верифікація результатів, що включає порівняння з незалежними наземними даними, аналіз відсотка правильно класифікованих пікселів та побудову матриці неточностей (confusion matrix). Типовими показниками якості є загальна точність (Overall Accuracy), коефіцієнт Каппа, точність за класами (Producer's Accuracy, User's Accuracy). Для підвищення достовірності класифікації доцільно застосовувати посткласифікаційну фільтрацію, усунення «шумових» пікселів, агрегацію дрібних класів та морфологічні операції, що покращують однорідність та цілісність тематичних шарів.

Завершальним етапом є підготовка результатів до подальшого аналізу. Класифіковані дані інтегрують у геоінформаційні системи (QGIS, ArcGIS) для просторового аналізу, побудови тематичних карт, оцінювання площ класів, вивчення динаміки змін та виявлення просторових закономірностей. На основі багатовисхідної класифікації виконують аналіз змін (change detection), який дозволяє оцінювати масштаби урбанізації, вирубок лісу, трансформацій сільськогосподарських угідь і змін водних площ. Використання даних Sentinel-2 та Landsat у поєднанні дозволяє досягти високої просторової та часової

точності і формує комплексне уявлення про сучасні процеси землекористування.

Таким чином, процедура класифікації земного покриву на основі супутникових даних Sentinel і Landsat є багатоступеневим процесом, що вимагає поєднання спектрального аналізу, математичного моделювання, корекційних процедур та геоінформаційних технологій. Висока якість класифікаційних карт забезпечує достовірну основу для моніторингу територій, прогнозування тенденцій розвитку та прийняття рішень у сфері сталого управління природними ресурсами.

3.3 Алгоритм визначення змін землекористування

Алгоритм визначення змін землекористування на основі супутникових зображень є фундаментальним інструментом просторового аналізу, що забезпечує можливість виявляти, кількісно оцінювати та інтерпретувати динаміку трансформацій земного покриву. В умовах зростаючого антропогенного навантаження, активної урбанізації, лісових вирубок, інтенсифікації сільського господарства та змін клімату такі дослідження набувають особливої актуальності. Мультичасові знімки Sentinel-2 та Landsat 8/9, завдяки високій спектральній якості та стабільності, є базовим джерелом інформації для аналізу змін, забезпечуючи необхідну часову та просторову деталізацію. Процедура виявлення змін включає кілька взаємопов'язаних етапів, спрямованих на максимальне підвищення точності та достовірності результатів.

Алгоритм визначення змін починається з формування вихідного набору супутникових даних. Для дослідження використовуються сцени одного сезону або близьких фенофаз рослинності, що дає змогу мінімізувати фенологічні відмінності, які можуть бути помилково розцінені як зміни земного покриву. Наприклад, зображення кінця весни та початку літа забезпечують оптимальний контраст між активною рослинністю, відкритими ґрунтами та урбанізованими територіями. Дотримання принципу сезонної узгодженості є критичним, оскільки зміна спектральних характеристик унаслідок природних сезонних

процесів (листопад, сніговий покрив, льодовий режим річок, вегетація культур) значно впливає на коректність результатів.

Наступним етапом є попередня обробка знімків, яка включає радіометричну, атмосферну та геометричну корекцію. Для Sentinel-2 зазвичай застосовується алгоритм Sen2Cor, який переводить зображення до рівня відбиття на поверхні (BOA), усуваючи впливи атмосферного аерозолі та водяної пари. Для Landsat використовують LaSRC або LEDAPS — алгоритми, що забезпечують перерахунок цифрових значень у фізично коректні коефіцієнти відбиття. Геометрична корекція забезпечує точне суміщення зображень за різні роки та різних супутників, що особливо важливо у гірських регіонах, де рельєф спричиняє паралакс. Коректність суміщення є ключовою, оскільки навіть незначні зміщення (1–2 пікселі) можуть призвести до хибних визначень змін.

Після підготовки зображень виконують розширення їхньої інформативності за допомогою спектральних індексів. Спектральні індекси дозволяють підсилити ознаки певних класів земного покриття й зменшити рівень шумів. NDVI використовується для виділення рослинності та визначення її стану; NDWI — для виявлення водних об'єктів і підтоплень; NDBI — для визначення міської забудови та штучних поверхонь; NBR — для аналізу наслідків пожеж; EVI — для деталізації густої рослинності. Значення індексів для двох різних дат можна порівнювати безпосередньо, оскільки вони нормалізовані й менш чутливі до атмосферних впливів. У регіонах зі складним рельєфом, таких як Івано-Франківська область, використання індексів може значно покращити виявлення змін на тіньових та неоднорідно освітлених ділянках.

Ключовим етапом алгоритму є вибір методології change detection. Один із найпоширеніших методів — піксельне віднімання (image differencing), при якому для кожного пікселя від значення спектрального індексу або каналу у другій даті віднімають відповідне значення у першій даті. Результати віднімання дають змогу визначити, які ділянки зазнали змін і в якому напрямі

— позитивному або негативному. Значні позитивні відхилення, як правило, свідчать про підвищення інтенсивності рослинності (відновлення лісів, заростання покинутих ділянок), тоді як негативні — про вирубки, пожежі, деградацію ґрунтів чи урбанізацію. Метод є простим, проте потребує точного визначення порогових значень для відокремлення реальних змін від шумів.

Важливою альтернативою є посткласифікаційне порівняння. У цьому випадку кожне зображення незалежно піддається класифікації з використанням методів керованого навчання, таких як Random Forest, SVM або Maximum Likelihood. На рисунку 3.2 представлено приклад комплексного аналізу змін землекористування та стану сільськогосподарських угідь із використанням даних дистанційного зондування Землі та наземних спостережень.



Рисунок 3.2 Комплексний аналіз змін землекористування та стану сільськогосподарських угідь

Фрагмент **(а)** демонструє супутниковий знімок орних земель, поділених на регулярну сітку полів, що характерно для інтенсивного аграрного землекористування. Відмінності у спектральних характеристиках окремих ділянок проявляються у зміні відтінків зеленого кольору, що відображає просторову неоднорідність рослинного покриву. Сині стрілки вказують на ділянки з аномальними або контрастними спектральними проявами, які можуть бути зумовлені різним станом посівів, неоднорідністю ґрунтових умов, впливом агротехнічних заходів або проявами деградаційних процесів. Такі особливості чітко ідентифікуються на супутникових знімках і є основою для подальшої тематичної класифікації земного покриву.

Фрагменти **(b)** та **(c)** ілюструють результати наземних візуальних обстежень відповідних ділянок. На зображенні **(b)** показано відносно рівномірний, густий рослинний покрив, що свідчить про задовільний стан посівів і сприятливі умови росту. Фрагмент **(c)** відображає нерівномірний розвиток рослинності з ознаками пригнічення, вилягання або зниження щільності біомаси, що корелює з виявленими на супутниковому знімку спектральними аномаліями.

Зіставлення супутникових даних (фрагмент а) з польовими спостереженнями (фрагменти b, c) підтверджує інформативність багатоспектральних знімків для виявлення просторової неоднорідності земного покриву. Такий підхід є науково обґрунтованою основою для класифікації стану посівів, моніторингу сільськогосподарських угідь та оцінки впливу природних і антропогенних чинників на продуктивність агроландшафтів.

У сучасних дослідженнях усе частіше застосовуються методи машинного навчання і глибинного навчання для визначення змін. Алгоритми Random Forest та SVM є стійкими до шумів та змішаних пікселів, а їхня здатність працювати з багатовимірними наборами ознак робить їх ефективними для мультичасових даних. Нейронні мережі, зокрема згорткові (CNN) та рекурентні архітектури (LSTM), дають змогу моделювати часові ряди та виявляти складні патерни змін, що особливо корисно для довготривалих аналізів на основі архіву Landsat. У

гірських регіонах такі моделі дозволяють коректно розпізнавати зміни у високогірних ландшафтах, де класичні методи часто дають хибні спрацьовування через тіні, сніговий покрив чи рельєфні особливості.

На рисунку 3.3 представлено приклад використання супутникових даних для картографування земного покриву на основі багатоспектральних зображень. У центральній частині показано мозаїчне супутникове зображення великої території, сформоване з окремих сцен, отриманих супутником Sentinel-2.

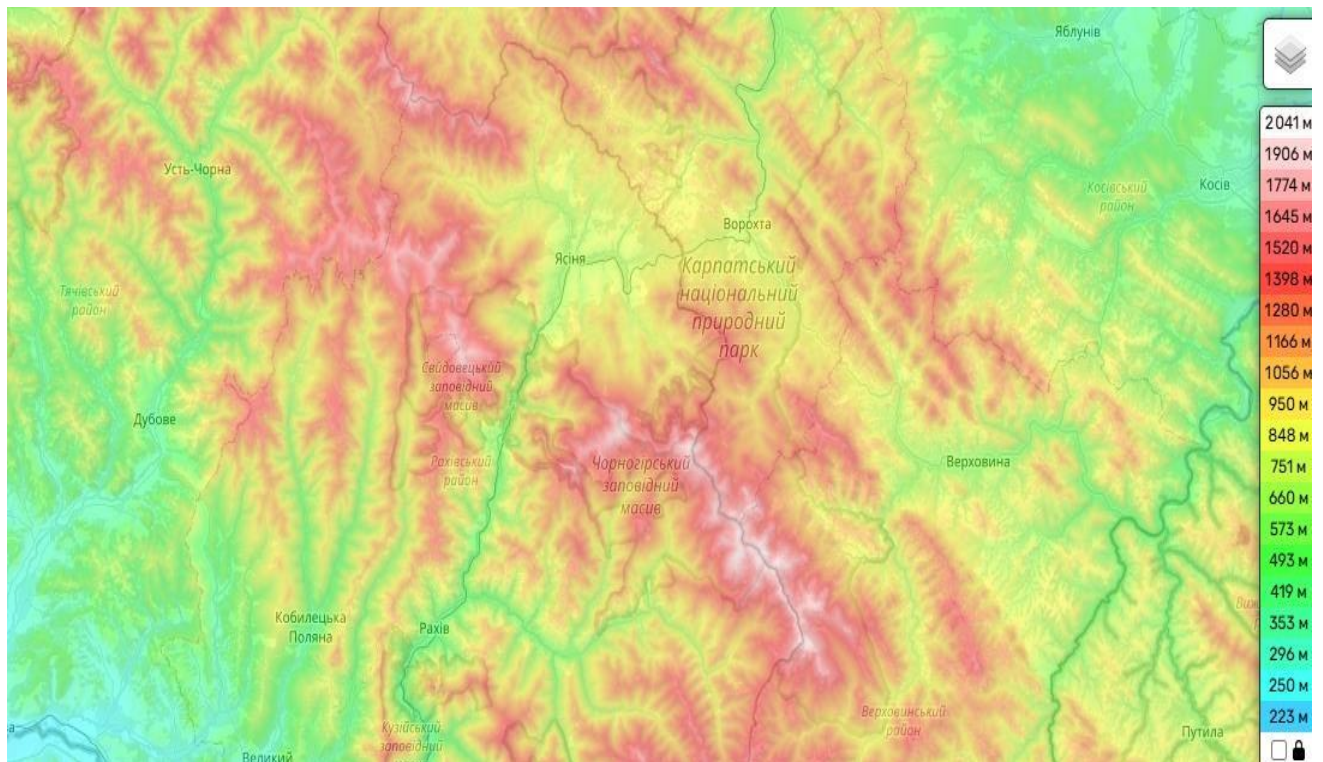


Рисунок 3.3 Супутникові дані картографування земного покриву на основі багатоспектральних зображень

На знімку чітко простежуються відмінності між різними природними зонами: темно-зелені ділянки відповідають територіям із щільним рослинним покривом, світло-зелені та жовтуваті — сільськогосподарським угіддям або саванам, коричневі та червонуваті — посушливим або малорослинним районам, а світлі плями — зонам з оголеними ґрунтами або скельними поверхнями. Сині та темні лінійні елементи відображають водні об'єкти та гідрографічну мережу.

Форма зображення та характерні «ступінчасті» краї мозаїки свідчать про поєднання кількох супутникових сцен, обмежених межами окремих

орбітальних проходів. Такий підхід дозволяє отримати суцільне покриття великої території та забезпечити просторову узгодженість даних для подальшого аналізу.

Рисунок представляє вихідний етап тематичного картографування земного покриву, на якому супутникові знімки використовуються як базова інформація для подальшої обробки, зокрема розрахунку спектральних індексів, класифікації земного покриву та оцінки просторової неоднорідності природних і антропогенних ландшафтів. Отримані дані є основою для екологічного моніторингу, аналізу землекористування та підтримки управлінських рішень у сфері просторового планування.

Після отримання карти змін необхідно провести верифікацію результатів. Верифікація включає порівняння із незалежними польовими даними, високодетальними аерофотознімками або іншими джерелами просторової інформації. На цьому етапі використовуються показники точності, такі як Overall Accuracy, коефіцієнт Каппа, точність користувача та виробника. Високі значення цих показників свідчать про достовірність алгоритму change detection. У випадку виявлення значних похибок здійснюється коригування порогових значень, повторна класифікація або уточнення навчальних вибірок.

Завершальним етапом алгоритму є інтерпретація та картографічне подання результатів. На основі карти змін створюються тематичні карти, що відображають категорії трансформацій: вирубки лісу, урбанізація, деградація орних земель, відновлення рослинності, зміни площ землекористування, тощо. Просторова інтерпретація дозволяє виявити закономірності змін — їхню локальність або регіональний характер, зв'язок з природними факторами або господарською діяльністю. Для гірських територій Івано-Франківської області особливо важливим є аналіз змін у лісових масивах, відкритих ґрунтах, гірських луках та руслових процесах, оскільки вони є чутливими індикаторами екологічного стану Карпатського регіону.

Алгоритм визначення змін землекористування є багатоступеневим процесом, що об'єднує супутникову передобробку, спектральний аналіз,

застосування інтелектуальних алгоритмів та верифікацію результатів. Використання знімків Sentinel-2 та Landsat 8/9 забезпечує високий рівень точності та операційності дослідження, а поєднання класичних та сучасних методів аналізу дозволяє отримати достовірні дані про просторову динаміку ландшафтів. Такі результати є критично важливими для моніторингу екологічних змін, планування територій та науково обґрунтованого управління природними ресурсами.

4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Охорона навколишнього середовища в умовах інтенсивних змін землекористування є одним із ключових завдань сучасного просторового управління та екологічної політики. Трансформації земного покриву, зумовлені розвитком сільського господарства, урбанізацією, вирубкою лісів і змінами клімату, призводять до порушення природних екосистем, деградації ґрунтів, зміни гідрологічного режиму та зниження біорізноманіття. У цьому контексті аналіз змін землекористування на основі супутникових знімків Sentinel та Landsat набуває особливого значення як інструмент своєчасного виявлення екологічних загроз і обґрунтування природоохоронних заходів.

Супутникові дані забезпечують регулярний і об'єктивний моніторинг земної поверхні, що дозволяє фіксувати як поступові, так і раптові зміни землекористування на великих територіях. Завдяки мультиспектральним характеристикам цих знімків можливе виділення основних компонентів земного покриву та оцінка їхнього стану. Аналіз спектральних індексів рослинності та вологості дає змогу виявляти деградацію лісів, зниження продуктивності агроландшафтів, процеси ерозії та порушення водних екосистем.

Зміни у структурі землекористування мають прямий вплив на екологічну рівновагу територій. Скорочення площ лісових масивів знижує здатність ландшафтів до регулювання стоку та утримання ґрунтів, що сприяє розвитку ерозійних процесів і паводкових явищ. Інтенсифікація сільськогосподарського використання земель призводить до виснаження ґрунтів і втрати природних біотопів, тоді як розширення урбанізованих територій спричиняє фрагментацію природних ландшафтів, збільшення техногенного навантаження та формування локальних теплових аномалій. Усі ці процеси чітко фіксуються за допомогою багаточасового аналізу супутникових знімків.

Використання геоінформаційних систем та хмарних платформ обробки супутникових даних дозволяє інтегрувати результати аналізу змін

землекористування в системи екологічного моніторингу. Отримані тематичні карти та просторові моделі можуть застосовуватися для оцінки екологічного стану територій, визначення зон підвищеного ризику деградації, планування природоохоронних заходів та контролю ефективності використання земельних ресурсів. Важливою складовою екологічної коректності таких досліджень є перевірка точності результатів, що забезпечує надійність інформації для прийняття управлінських рішень.

Узагальнюючи викладене, слід зазначити, що застосування супутникових знімків у аналізі змін землекористування формує сучасну науково обґрунтовану основу для охорони навколишнього середовища. Регулярний моніторинг земного покриву дозволяє своєчасно виявляти негативні екологічні процеси, оцінювати масштаби антропогенного впливу та визначати території з підвищеним рівнем екологічного ризику. Отримані результати є важливими для формування системи превентивних природоохоронних заходів, спрямованих на запобігання деградації земель, збереження лісових і водних екосистем та оптимізацію структури землекористування.

Використання даних дистанційного зондування Землі сприяє переходу від фрагментарних і вибіркових спостережень до комплексного, просторово узгодженого та багатоаспектного аналізу довкілля. Поєднання високої просторової деталізації Sentinel-2 із довготривалими часовими рядами Landsat забезпечує можливість не лише фіксації поточного стану територій, але й оцінювання динаміки змін у контексті кліматичних, природних та соціально-економічних чинників. Це особливо важливо для регіонів зі складною ландшафтною структурою, де навіть незначні зміни землекористування можуть мати суттєві екологічні наслідки.

Таким чином, аналіз змін землекористування за супутниковими даними Sentinel та Landsat є невід'ємною складовою системи охорони навколишнього середовища, що забезпечує наукову підтримку управлінських рішень, підвищує ефективність екологічного контролю та сприяє реалізації принципів сталого розвитку. Отримані в межах магістерської роботи результати підтверджують

доцільність і перспективність використання супутникових технологій як одного з ключових інструментів сучасного екологічного моніторингу та раціонального використання земельних ресурсів.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено можливості та методичні підходи до аналізу змін землекористування на основі супутникових знімків Sentinel-2 та Landsat 8/9 із використанням методів дистанційного зондування Землі, спектрального аналізу, класифікації земного покриву та геоінформаційних технологій. Доведено, що супутникові дані є ефективним інструментом для просторово-часового моніторингу трансформацій земного покриву, особливо на територіях зі складною природно-ландшафтною структурою та високою динамікою антропогенного впливу.

У процесі виконання роботи обґрунтовано актуальність дослідження змін землекористування як важливого чинника екологічної безпеки та сталого розвитку територій, оскільки зміни структури земного покриву безпосередньо впливають на стан екосистем, ґрунтів, водних ресурсів і біорізноманіття. Показано, що традиційні методи спостереження є недостатньо ефективними для регулярного та масштабного аналізу, тоді як дистанційне зондування забезпечує об'єктивність, повторюваність та просторову узгодженість результатів.

Встановлено, що супутникові платформи Sentinel-2 та Landsat виконують взаємодоповнювальні функції в аналізі змін землекористування. Sentinel-2 забезпечує високу просторову й часову роздільність та підвищену чутливість до стану рослинності завдяки наявності каналів red-edge, що є особливо важливим для моніторингу аграрних і лісових ландшафтів. Landsat, у свою чергу, надає стабільні багаторічні часові ряди та теплову інформацію, що дозволяє аналізувати довготривалі тенденції трансформації земного покриву та зміни температурного режиму поверхні.

У роботі розроблено та апробовано комплексну методику аналізу змін землекористування, яка включає підбір сезонно узгоджених супутникових знімків, виконання атмосферної та геометричної корекції, формування набору спектральних індексів, проведення керованої класифікації земного покриву та посткласифікаційного порівняння результатів за різні часові періоди.

Застосування індексів NDVI, NDWI, NDBI, NBR та інших дозволило підвищити контрастність між класами та покращити інтерпретацію змін.

Доведено, що використання алгоритмів машинного навчання, зокрема Random Forest та Support Vector Machine, забезпечує вищу точність класифікації у порівнянні з традиційними статистичними методами, особливо в умовах мозаїчної структури землекористування та наявності змішаних пікселів. Посткласифікаційний аналіз змін дозволив не лише виявити факт трансформації земного покриву, але й визначити напрямки переходів між класами, що є важливим для екологічної інтерпретації результатів.

Отримані результати підтверджують, що аналіз змін землекористування за даними Sentinel та Landsat є науково обґрунтованим і практично значущим підходом, який може бути використаний для екологічного моніторингу, контролю використання земельних ресурсів, оцінки деградаційних процесів, виявлення осередків вирубок, урбанізаційного тиску та змін гідрологічного режиму. Результати роботи можуть слугувати інформаційною основою для прийняття управлінських рішень у сфері просторового планування та охорони навколишнього середовища.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. В. І. Зацерковний. Геоінформаційні системи в науках про Землю / В. І. Зацерковний, І. В. Тішаєв, І. В. Віршило, В. К. Демидов – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2016. – 510 с.
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 р. №1264-XII, URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>
3. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 р. № 2694-XII, URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>
4. Засади сталого розвитку Косівщини . – за ред. Г.Д. Гуцуляка. – Чернівці : Прут, 2005. – 208 с. 12. Ліси Косівщини: стан та принципи сталого господарювання, URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2004/14_3/50.pdf
5. Земельний кодекс України, URL: Земельний кодекс України | від 25.10.2001 № 2768-III
6. Інструкція з виконання топографо-геодезичного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500: Наказ Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України № 56 від 09.04.1998 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0393-98#Text>.
7. Історія розвитку геоінформаційних систем, URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/30460/2/IMST_2019_Skliarova_THistory_of_geoinformation_98.pdf
8. Катренко Л.А., Пістун І.П. Охорона праці в галузі освіти: Навчальний посібник. 2-ге вид., доп. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2004. – 304 с.
9. Магнетикон. Геоінформаційна система для управління лісовим господарством, URL: <https://magneticonemt.com/geoinformatsijna-systema-dlyalisovogo-gospodarstva/> (дата звернення 17.03.2025) 6. NGC. ГІС-рішення для лісового господарства, URL: <https://ngc.com.ua/ua/info/solutionforforest.html>

10. Методичні рекомендації для написання кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти ОС «Магістр» за спеціальністю 193 Геодезія та землеустрій / Укл.: Колодій П., Таратула Р. – Львів, ЛНУП, 2023. – 33 с.
11. Основи геоінформатики: Навчальний посібник / За заг. ред. О.О. Світличного. - Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. - 295 с.
12. Основи охорони довкілля в Україні. URL: <https://www.bsmu.edu.ua/blog/4413-osnovi-ohoroni-dovkillya-v-ukraini/>.
13. Особливості регулювання земельних відносин в умовах воєнного стану, URL: <https://legalaid.gov.ua/publikatsiyi/osoblyvosti-regulyuvannya-zemelnyhvidnosyn-v-umovah-voyennogo-stanu/>
14. Постанова Кабінету Міністрів України «Про публічний моніторинг земельних відносин» від 12 травня 2023 р. №474, URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/474-2023-%D0%BF#Text>
15. Рій І. Ф., Бочко О. І., Біда О. Ю. Електронні геодезичні прилади : навч. пос.– Львів : «ГАЛИЧ-ПРЕС», 2021. – 336 с.: іл.
16. Савчук С. Г. Вища геодезія. Сфероїдна геодезія: підручник. Львів, 2000. 248 с.
17. Сновидов І. Фактори, що впливають на точність промірювань. Вісник Держгідрографії. 2015. № 1 (48). С. 4-6.
18. Черняга П. Г., Бялик І. М., Янчук Р. М. Супутникова геодезія: навч. посібник (2-ге вид.). Рівне: НУВГП, 2014. 222 с.
19. Шумаков Ф. Т. Конспект лекцій з дисципліни «Супутникова геодезія» (для студентів 4 курсу денної форми навчання, спеціальності 7.070900 «Геоінформаційні системи та технології»). Харків, 2009. 88 с. 20. Що таке VRS і як це працює? URL: <https://ipit.ooo/pl/what-is-vrs-andhow-does-it-work>. 21. SystemNET. URL: <https://systemnet.com.ua/ua/>.
20. Редей Н.М., Горбатенко А.А. Геоінформаційний моніторинг екологічного стану локальних агроєкосистем. Київ : Гельветика, 2019. 236 с.

21. 42.Сиротенко О. Б. Вибіркове обстеження сільськогосподарських культур. «Регіональна нарада «Можливості дистанційного зондування Землі та геоінформаційні технології у вирішенні проблем Київщини» (м. Київ, 20–21 берез. 2007 р.). Київ, 2007.
22. Сінна О. І. Ландшафтно-екологічне картографування на основі геоінформаційних технологій (на прикладі Харківської області) : автореферат. 62 Київ, 2014. 20 с.
23. Тараріко О. Г., Сиротенко О. В., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л. Агроєкологічний супутниковий моніторинг. Київ : Аграр. наука, 2019. 204 с.
24. Трушева С.С. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Моніторинг якості ґрунтів» студентам спеціальності 7.09010102 «Агрохімія і ґрунтознавство». Рівне : НУВГП, 2013. 22 с. 46. Шевченко А. М., Власова О. В. Просторове оцінювання вологозабезпеченості агроландшафтів степової зони України. Агроєкологічний журнал. 2012. С. 35–38.
25. Шевчук С. М., Пуденко О. Р. Можливості використання технологій ГІС та ДЗЗ при екологічному моніторингу Макухівського сміттєзвалища в Полтавській області. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2022. № 2. С. 165– 174.
26. Шевчук С. М., Прокопенко Н. І., Рожі Т. А. Аналіз використання геодезичних даних при плануванні та моніторингу агроландшафтів: оптимізація землекористування та охорони природи. Просторовий розвиток: Науковий збірник / Головн. ред. О. Шкуратов. К., КНУБА, 2024. Вип. 7. С. 445–458.