

**Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
з дисципліни «Дистанційне зондування Землі»
зі спеціальності «Технології захисту
навколишнього середовища»**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
з дисципліни «Дистанційне зондування Землі»
зі спеціальності «Технології захисту
навколишнього середовища»**

Вінниця
ВНТУ
2026

Рекомендовано до видання Радою з якості освіти Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 28.05.2026 р.)

Рецензенти:

В. Г. Петрук, доктор технічних наук, професор

О. О. Ткачук, кандидат біологічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Дистанційне зондування Землі» зі спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища» / уклад. С. М. Кватернюк. Електрон. текст. дані. Вінниця : ВНТУ, 2026. 25 с.

Методичні вказівки призначені для студентів екологічних спеціальностей та містять рекомендації щодо виконання практичних робіт з дисципліни «Дистанційне зондування Землі». Методичні вказівки розроблено відповідно до навчальної програми дисципліни «Дистанційне зондування Землі».

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Практична робота 1.....	5
Практична робота 2.....	9
Практична робота 3.....	11
Практична робота 4.....	14
Практична робота 5.....	17
Практична робота 6.....	19
Практична робота 7.....	21
Перелік літератури.....	23

ВСТУП

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) становить фундаментальну науково-технічну основу сучасних методів моніторингу навколишнього середовища, просторового аналізу та управління природними ресурсами. Систематичний огляд планети з космосу розпочався у квітні 1960 року із запуском американського метеорологічного супутника Tiros-1, що відкрило нову еру у вивченні глобальних кліматичних, геологічних та біосферних процесів. Класична парадигма географічних, екологічних та геологічних досліджень традиційно базувалася на локальних (контактних) польових вимірюваннях, передбачаючи безпосередній збір зразків та аналіз мінералогічного чи ґрунтового складу на місці. Сучасні вимоги до інформаційного забезпечення зумовлюють необхідність інтеграції цих класичних підходів із глобальними супутниковими даними. Зондування поверхні дозволяє здійснювати перехід від дискретної картини точкових показників до безперервного просторового моделювання в умовах, коли фізичний контакт з об'єктом є неможливим, економічно недоцільним або ж потребує масштабної генералізації даних на значних територіях.

Метою дисципліни «Дистанційне зондування Землі» є засвоєння студентами основних теоретичних положень про можливості застосування геоінформаційних систем та дистанційного зондування Землі у процесі дослідження, основні характеристики і ресурси для завантаження супутникових знімків, візуалізацію та попереднє опрацювання каналів супутникового знімка в геоінформаційних системах, процес інтерпретації (дешифрування) та аналізу супутникових знімків у геоінформаційних системах.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Дистанційне зондування Землі» є ознайомлення з основними методами та принципом дії геоінформаційних систем для дистанційного зондування Землі, штучними супутниками для дистанційного зондування, основами дослідження лісового покриву, водних об'єктів, агроландшафтів, урболандшафтів, антропогенних змін природного ландшафту.

У результаті виконання запропонованого комплексу практичних робіт формуються стійкі навички роботи з растровими даними різних космічних систем (Landsat, Sentinel), застосування статистичних алгоритмів для розпізнавання образів, побудови індексних карт, виконання ортотрансформування та проведення мультитемпорального аналізу динаміки змін земної поверхні. Потенційні переваги методів дистанційного зондування найбільше розкриваються у сфері глобального моніторингу, де оглядовість матеріалів та швидкість отримання даних відіграють вирішальну роль в оцінці стану сільськогосподарських угідь, лісових ресурсів, водних басейнів та урбанізованих територій.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТА АПАРАТНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Завдання практичної роботи полягає у фундаментальному вивченні фізичних закономірностей поширення електромагнітного випромінювання, взаємодії випромінювання з атмосферою та земною поверхнею, а також у класифікації орбітальних параметрів, сенсорних систем та супутникових комплексів моніторингу.

Система дистанційного зондування формується з кількох ключових структурних елементів: джерела енергії (переважно Сонця у пасивних системах або бортового передавача в активних), середовища поширення випромінювання (атмосфери), об'єкта дослідження, реєструючого сенсора на борту носія, системи передачі інформації на наземні комплекси керування та прийому, а також інфраструктури подальшої тематичної обробки й інтерпретації даних. Зондування здійснюється у різних ділянках електромагнітного спектра, характеристики якого визначають технологічні можливості апаратури та інформативність отриманих знімків.

Таблиця 1.1 – Діапазони роботи засобів дистанційного зондування

Назва діапазону	Довжина хвилі	Частота
Ультрафіолетовий	100 Å – 400 нм	750 - 3000 ТГц
Видимий	400 – 760 нм	430 - 750 ТГц
Ближній інфрачервоний	760 нм – 1,3 мкм	230 - 430 ТГц
Середній інфрачервоний	1,3 мкм – 3,5 мкм	100 - 230 ТГц
Проміжний інфрачервоний	3,5 мкм – 7 мкм	38 - 100 ТГц
Тепловий інфрачервоний	7 мкм – 14 мкм	22 - 38 ТГц
Міліметровий (радіо)	1 мм - 10 мм	30 - 300 ГГц
Сантиметровий (радіо)	1 см - 10 см	3 - 30 ГГц

Дані частотних діапазонів ілюструють спектральні вікна, доступні для апаратури дистанційного зондування. Ділянка спектра з довжиною хвилі від 0,38 мкм до 3 мкм формує частину, де вимірювана енергія є переважно відбитим сонячним випромінюванням. У проміжному інфрачервоному діапазоні зондування майже не проводиться через колосальний вплив атмосферного поглинання, тоді як тепловий інфрачервоний діапазон (7-14 мкм) використовується для фіксації власного випромінювання нагрітих об'єктів.

Фізика теплового випромінювання базується на законах термодинаміки. Інтенсивність випромінювання в заданому напрямку визначається законом Ламберта, де інтенсивність I пропорційна косинусу кута α між нормаллю та напрямком випромінювання. Згідно з формулою Планка, потік енергії, що випромінюється одиницею поверхні абсолютно чорного тіла, має яскраво виражений максимум, який зі зростанням температури зміщується в область коротких хвиль. Повна енергія у всьому діапазоні довжин хвиль описується формулою Стефана-Больцмана, за якою інтеграл потоку пропорційний четвертому ступеню температури T^4 . При реєстрації теплового випромінювання розраховується радіаційна температура, яка відрізняється від термодинамічної на величину коефіцієнта теплового випромінювання (наприклад, 0,98-0,99 для води та 0,97 для густої трави).

Проходження електромагнітних хвиль через атмосферу супроводжується комплексними ефектами поглинання, розсіювання, рефракції та фазової дисперсії. Ефект Фарадея, наприклад, полягає у розщепленні лінійно поляризованої хвилі в іоносфері під дією магнітного поля Землі, що призводить до повороту площини поляризації. Поглинання в гідрометеорах (дощ, сніг, туман) та атмосферних газах (кисень, водяна пара) є критичним фактором для діапазонів частот вище 500 МГц. Оптичне випромінювання вибірково поглинається озоном, вуглекислим газом та водою, тому зондування проводиться виключно у «вікнах прозорості»: 0,74-2,40 мкм, 3,40-4,20 мкм, 8,0-13,0 мкм та 30,0-80,0 мкм. Розсіювання Мі та Релеївське розсіювання найінтенсивніше проявляються у синій та блакитній зонах спектра (0,38-5 мкм), що знижує контрастність зображення та вимагає обов'язкової атмосферної корекції.

Апаратура дистанційного зондування класифікується на пасивні та активні системи. До пасивних належать радіометри, спектрометри, телевізійні та фотографічні камери. Радіометри, що вимірюють антенну температуру на тлі високого рівня шумів, поділяються на компенсаційні, модуляційні, адитивно-шумові та кореляційні. Компенсаційні схеми теоретично мають найвищу чутливість, проте через значні флуктуації коефіцієнта підсилення їх практична реалізація ускладнена. Модуляційні радіометри періодично перемикають вхід між антеною та узгодженим навантаженням, перетворюючи постійну складову на низькочастотну зміну, що виділяється синхронним детектором. Адитивно-шумові системи

додають еталонний сигнал до антенної температури, а кореляційні використовують двоканальну обробку для компенсації власних некорельованих шумів приймача.

Спектрометри забезпечують розділення поліхроматичного випромінювання на окремі спектральні компоненти за допомогою диспергуючих елементів (призм або дифракційних решіток) або методів інтерферометрії (інтерферометри Міхельсона, Фебрі-Перота). Приймачами випромінювання виступають теплові та фотонні детектори. Теплові детектори однаково реагують на всі довжини хвиль, однак характеризуються значною інерційністю. Фотонні детектори мають швидкий відгук, зумовлений квантовими переходами електронів у зоні провідності при поглинанні фотона з енергією, що перевищує енергетичний бар'єр $E \geq h \cdot \nu$. Гранична довжина хвилі для фотонного детектора обчислюється як $\lambda \leq hc/E$.

Активні системи включають радіолокатори бокового огляду, скатерометри, радіовисотоміри та лазерні локатори (лідари). Скатерометри вимірюють питому ефективну площу розсіювання поверхні. Наприклад, для морської акваторії інтенсивність зворотного розсіювання прямо пропорційна швидкості приводного вітру, що визначається шляхом почергового опромінення поверхні двома променями з різними азимутами. Лазерна локація (лідарні системи типу ALTM) використовує напівпровідникові лазери ближнього інфрачервоного діапазону (1047 нм). До складу лідара входить скануючий блок, бортовий навігаційний комплекс (з інерційною системою IMU та GPS) та блок вимірювання часових інтервалів (TIM). Розгортка лазерного променя може здійснюватися за допомогою коливального дзеркала (що забезпечує гнучке налаштування ширини смуги та частоти), поворотної призми (гарантує ідеальну рівномірність розподілу точок) або оптичного клина (дозволяє отримувати відгуки від вертикальних об'єктів за рахунок подвійного сканування ділянки).

Сучасний орбітальний сегмент моніторингу представлений низкою високотехнологічних систем. Серед них виділяється американська система LANDSAT, яка забезпечує глобальний збір спектральних даних. Передача інформації із супутника Landsat-5 здійснювалася в S-діапазоні радіолінії з центральною частотою 2265,5 МГц, потужністю бортового передавача 10 Вт, правою круговою поляризацією, кодово-імпульсною частотною модуляцією (KIM-ЧМ) з девіацією $\pm 5,6$ МГц та швидкістю передачі 15,0626 Мбіт/с. Європейська система SPOT (зокрема Spot-5) функціонує на сонячно-синхронній орбіті висотою 822 км, забезпечуючи цикл покриття у 26 діб (369 орбітальних обертів) зі швидкістю передачі даних понад 50 Мбіт/с у X-діапазоні (8025-8400 МГц). Комерційні системи високої розрізненості, такі як GeoEye-1, WorldView-1/2 та QuickBird, дозволяють отримувати панхроматичні зображення з роздільною здатністю до 0,41–0,61 м, здійснюючи зйомку в кадровому, маршрутному або

стереоскопічному режимі зі швидкістю скидання даних на наземні станції до 800 Мбіт/с .

Радіолокаційне спостереження забезпечується системами ERS, ENVISAT та RADARSAT. Радари із синтезованою апертурою (SAR) працюють переважно у С-діапазоні (довжина хвилі 5,6 см), використовуючи різноманітні конфігурації поляризації та кутів падіння. Радіолінії передачі системи RADARSAT функціонують на частотах 8105 МГц та 8230 МГц із загальною випромінюваною потужністю 11 дБВт та швидкістю потоку до 105 Мбіт/с. Метеорологічний моніторинг здійснюється низькоорбітальними (NOAA, «Метеор») та геостаціонарними апаратами (GOES, METEOSAT, GMS). Система NOAA використовує дециметровий діапазон, передаючи сигнали через підсилювачі потужністю 5,25 Вт на частотах 1698 МГц, 1702 МГц та 1707 МГц з правою та лівою круговою поляризаціями для уникнення інтерференції між супутниками. Геостаціонарні апарати METEOSAT забезпечують передачу зображень у реальному часі на частоті 1586 МГц за допомогою фазової модуляції зі швидкістю 666 кбіт/с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 2

ДЖЕРЕЛА АЕРОКОСМІЧНИХ ДАНИХ ТА ОСНОВИ ВІЗУАЛЬНОГО ДЕШИФРУВАННЯ

Завдання роботи полягає у практичному освоєнні інтерфейсів глобальних архівів супутникових даних, здійсненні просторово-часових запитів та вивченні базових методів візуального розпізнавання об'єктів на растрових зображеннях.

Процедура дешифрування є аналітичним процесом розпізнавання об'єктів земної поверхні, ідентифікації їхніх властивостей і встановлення просторових взаємозв'язків. Традиційно воно поділяється на візуальне, інструментальне та автоматизоване. Візуальне дешифрування спирається на прямі дешифрувальні ознаки, до яких належать форма, розмір, тон, колір, тінь та текстура зображення. Наприклад, річкова мережа дешифрується за звивистою стрічкоподібною формою та темним тоном води, тоді як антропогенні об'єкти (мости, дороги) вирізняються чіткою геометрією та контрастним лінійним контуром. Непрямі дешифрувальні ознаки базуються на просторових асоціаціях (присутність певних типів рослинності може вказувати на специфічний гідрологічний режим ґрунтів).

Для первинного візуального дешифрування та оперативної оцінки території застосовуються спеціалізовані картографічні програми та хмарні сервіси. Наприклад, програмний комплекс SAS. Планета дозволяє завантажувати й об'єднувати супутникові покриття високої роздільної здатності з сервісів GoogleMaps, VirtualEarth тощо, зберігаючи їх локально для офлайн-аналізу, визначення географічних координат, вимірювання лінійних розмірів та площ полігонів. Глобальний веб-сервіс EO Browser (платформа Sentinel Hub) інтегрує мультиспектральні дані місій Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat та MODIS. Цей інструмент дозволяє здійснювати пошук за територією (за назвою населеного пункту або координатами), фільтрувати дані за параметрами хмарності (наприклад, менше 10%) і часовим діапазоном. Окрім візуалізації у природних (True color) та штучних кольорах (False color), EO Browser підтримує інтеграцію користувацьких скриптів (Custom scripts) на мові JavaScript, що дозволяє обробляти піксельні значення та розраховувати нестандартні індекси безпосередньо у вікні браузера.

Для повноцінної комп'ютерної обробки багатоспектральних даних використовуються фундаментальні наукові архіви Геологічної служби США (USGS) та Європейського космічного агентства (ESA).

Отримання даних місій Landsat 4, 5, 7, 8 та 9 реалізується через систему USGS EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov). Після обов'язкової реєстрації користувач здійснює просторовий запит за допомогою інструментів полігонального виділення або введення координат (Search Limits). У вкладці

Data Sets необхідно обрати бажаний рівень продукту, наприклад Landsat Collection 2 Level-2, який забезпечує дані з поверхневим відбиттям (Surface Reflectance), вже скориговані з урахуванням атмосферних аерозолів.¹ Отримані результати аналізуються за допомогою функцій Show Footprint (показ меж сцени) та Show Browse Overlay (попередній перегляд). Архів формату Product Bundle містить масив файлів .TIF для кожного спектрального каналу, а також системний файл метаданих _MTL.txt. Аналіз метаданих є критично важливим етапом, оскільки файл містить координати кутів знімка (наприклад, Corner UL Projection X/Y Product), інформацію про систему координат (UTM, WGS84), дату зйомки, кут піднесення Сонця та параметри радіометричного калібрування (Multiplicative Factor, Additive Factor), що необхідні для конвертації цифрових значень (DN) у фізичні величини.

Аналогічно, доступ до даних місій Sentinel-1 (радарні) та Sentinel-2 (оптичні) забезпечується через платформу Copernicus Data Space Ecosystem (dataspace.copernicus.eu). Інтерфейс платформи дозволяє фільтрувати результати за рівнями обробки: Level-1C (корекція на верхній межі атмосфери) або Level-2A (корекція відбиття на рівні поверхні).¹ Завантажений архів формату .SAFE має розгалужену внутрішню структуру, де графічні файли (у форматі .jp2) розміщені у підкаталогах GRANULE/IMG_DATA, а ключова координатна та радіометрична інформація міститься у файлах MTD_MSIL1C.xml або MTD_MSIL2A.xml.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 3

КООРДИНАТНА ПРИВ'ЯЗКА ТА ГЕОМЕТРИЧНЕ ТРАНСФОРМУВАННЯ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

Завдання. Опанувати методи усунення геометричних спотворень на знімках, алгоритми розстановки наземних опорних точок (GCP), оцінки математичних моделей перетворення та проведення ортотрансформування з використанням ЦМР у спеціалізованих програмних комплексах.

Методика виконання

Кейс 1. Базова просторова реєстрація растрового зображення

1. Завантажте растрове зображення, що не має суворої картографічної прив'язки (у середовищі MapInfo через діалог *Open table*).
2. Задайте тип картографічної проекції (наприклад, *Latitude/Longitude (WGS84)*).
3. Знайдіть на зображенні 4–5 чітко розпізнаваних об'єктів (перехрестя магістралей, кути капітальних споруд, гідрологічні об'єкти) для створення наземних опорних точок (GCP). Вони мають бути рівномірно розподілені по периметру та в центрі зображення.
4. Внесіть просторові координати для кожної точки у десяткових градусах, враховуючи, що довгота (*Longitude*) відповідає осі X, а широта (*Latitude*) – осі Y.

Примітка: При роботі в ГІС TNTlite процедура реалізується через модуль *Edit -> Georeference*. Використовуйте інструмент *Crosshair* у режимі *Add Mode* для встановлення відповідності між знімком та еталонною картою-зразком.

Кейс 2. Глибоке математичне трансформування багатоспектральних сцен (Erdas Imagine)

1. Відкрийте знімок у модулі *Multipoint Geometric Correction* пакета Erdas Imagine.
2. Проведіть трансформацію, обравши відповідну математичну модель:
Афінне перетворення (поліном 1-го ступеня): виберіть мінімум 3 опорні точки для компенсації паралельного перенесення, обертання та масштабування.
Нелінійні деформації (поліном 2-го або 3-го ступеня): виберіть понад 10 рівномірно розподілених точок для виправлення складніших спотворень.
3. Розподіліть створені точки на дві категорії:
Control (опорні) – для розрахунку коефіцієнтів матриці трансформування.
Check (контрольні) – для незалежної оцінки якості моделі.

Кейс 3. Оцінка точності моделі та передискретизація

1. Обчисліть середньоквадратичну помилку (RMSE) за контрольними точками.
2. Проаналізуйте сумарну помилку (*Total RMS*). Якщо вона перевищує допустимий ліміт (половину розміру пікселя), відредагуйте або видаліть з таблиці точку з найгіршими показниками.
3. Після оптимізації моделі запустіть процес передискретизації (*Resampling*). Сформууйте нову растрову матрицю, обравши один із методів:
Найближчого сусіда (*Nearest Neighbor*)
Білінійної інтерполяції (*Bilinear Interpolation*)
Кубічної згортки (*Cubic Convolution*)
4. Виконайте візуальний контроль результатів шляхом накладання трансформованого знімка на опорний за допомогою інструмента «Шторка» (*Swipe*).

Кейс 4. Ортотрансформування знімків надвисокої розрізненості

1. Використайте сучасний знімок (QuickBird або WorldView) разом із моделлю раціональних поліноміальних коефіцієнтів (RPC).
2. Підключіть цифрову модель рельєфу (ЦМР), зокрема матрицю висот місії SRTM.
3. Виконайте ортотрансформування на базі RPC та ЦМР для компенсації паралаксу та спотворень, зумовлених перепадами рельєфу, отримавши ортофотоплан з метричною точністю.

Вхідні космічні та аерознімки, як правило, не мають суворої картографічної прив'язки або містять суттєві геометричні спотворення, зумовлені дисторсією об'єктива, кутом нахилу оптичної осі під час зйомки, кривизною поверхні Землі та перепадами висот рельєфу. Геометричне трансформування зображення – це математичний процес його перетворення з метою приведення до заданого масштабу та картографічної проекції шляхом усунення систематичних та випадкових зсувів.

Процедура прив'язки базується на використанні наземних опорних точок (Ground Control Points – GCP). Опорні точки є чітко розпізнаваними об'єктами на зображенні (перехрестя магістралей, кути капітальних споруд, дамби, гідрологічні об'єкти), просторові координати яких відомі з високою точністю на основі геодезичних вимірювань, еталонних ортофотопланів або топографічних карт. Процес встановлює однозначну відповідність між піксельними координатами знімка (строки і стовпці) та плановими географічними чи прямокутними координатами.

У програмному середовищі MapInfo просторова реєстрація растрового зображення починається з відкриття растра через діалог *Open table*. Програма пропонує задати тип проекції у вікні *Projection* (наприклад, стандартну *Latitude/Longitude (WGS84)*) і перейти до додавання опорних точок. При внесенні координат необхідно враховувати, що довгота

(Longitude) відповідає осі X, а широта (Latitude) – осі Y. Усі координати повинні бути переведені в десяткові градуси. Аналогічний алгоритм реалізується в ГІС TNTlite через модуль Edit -> Georeference. Використовуючи еталонну векторну або растрову карту-зразок, користувач встановлює відповідність точок за допомогою інструмента Crosshair у режимі Add Mode. Для гарантування точності необхідно вибирати щонайменше 4-5 точок, рівномірно розподілених по периметру та в центрі зображення.

Для глибокого математичного трансформування багатоспектральних сцен застосовується модуль Multipoint Geometric Correction у пакеті Erdas Imagine. Тут користувач може вибирати математичні моделі перетворення: від лінійних поліноміальних моделей до складних орбітальних. Поліном першого ступеня (афінне перетворення) вимагає мінімально 3 опорні точки і здатний компенсувати паралельне перенесення, обертання та масштабування. Для виправлення нелінійних деформацій використовуються поліноми другого або третього ступеня, що потребує значно більшої кількості (понад 10) рівномірно розподілених точок.

В Erdas Imagine впроваджено поділ опорних точок на дві категорії: Control (опорні) та Check (контрольні). Контрольні точки не беруть участі у розрахунку коефіцієнтів матриці трансформування, а слугують для незалежної оцінки якості моделі шляхом обчислення середньоквадратичної помилки (Root Mean Square Error – RMSE). Якщо сумарна помилка (Total RMS) перевищує допустимий ліміт (зазвичай половина розміру пікселя), точка з найгіршими показниками редагується або видаляється з таблиці.¹ Після оптимізації моделі запускається процес передискретизації (Resampling), у якому формується нова растрова матриця. Обчислення значень яскравості перенесених пікселів виконується методами Найближчого сусіда (Nearest Neighbor), Білінійної інтерполяції (Bilinear Interpolation) або Кубічної згортки. Оцінка результатів здійснюється шляхом візуального накладання трансформованого знімка на опорний із використанням інструмента «Шторка» (Swipe).

Ортотрансформування сучасних знімків надвисокої розрізненості (наприклад, QuickBird, WorldView) вимагає застосування раціональних поліноміальних коефіцієнтів (Rational Polynomial Coefficients – RPC), що постачаються у комплекті зі знімком. Модель RPC емпірично описує геометричний зв'язок між тривимірними координатами місцевості та двовимірними координатами знімка. Для компенсації паралаксу та спотворень, зумовлених перепадами рельєфу, ортотрансформування на базі RPC обов'язково використовує цифрову модель рельєфу (ЦМР), зокрема матриці висот місії SRTM. Цей комплексний підхід гарантує створення ортофотопланів з метричною точністю, придатною для створення топографічних карт.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 4

СИНТЕЗ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ДАНИХ ТА ПРОСТОРОВЕ ЗЛИТТЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Завдання. Використовуючи програмні комплекси QGIS або ESA SNAP, виконайте просторове обрізування супутникових знімків на досліджувану територію та синтезуйте вихідні монохромні канали у різні багатоканальні композити (RGB) для візуального дешифрування. Після цього застосуйте процедуру паншарпенінгу (просторового злиття з панхроматичним каналом) для підвищення просторової розрізненості та геометричної деталізації отриманого мультиспектрального зображення.

Методика виконання

Необроблені мультиспектральні канали супутникових сенсорів представлені у вигляді одноканальних монохромних (чорно-білих) зображень, де інтенсивність сірого відповідає інтенсивності відбитого випромінювання у вузькій ділянці спектра. Для проведення результативного візуального аналізу та дешифрування ці монохромні растри об'єднуються (синтезуються) у багатоканальні композити шляхом присвоєння певних спектральних діапазонів до основних кольорів: червоної (R), зеленої (G) та синьої (B).

В інформаційній архітектурі QGIS синтез здійснюється за допомогою плагіна Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Модуль Band set дозволяє згрупувати завантажені розпаковані канали (наприклад, TIF-файли Landsat) у єдиний набір та задати віртуальні комбінації через інструмент RGB list. Залежно від обраних каналів створюються різні види композитів.

Для зменшення обчислювального навантаження на систему перед синтезом та подальшою обробкою доцільно виконати просторове обрізування сцени (Clipping) до меж досліджуваної території. У пакеті QGIS пакетне вилучення області (Clip Raster by Extent) дозволяє обрізати синхронно всі обрані спектральні канали, використовуючи екстент карти або векторний шар-маску. У системі SNAP ця операція реалізується інструментом Spatial Subset, який дозволяє вирізати фрагмент за географічними координатами, піксельними розмірами або безпосередньо з екрана перегляду (Spatial Subset from View).

Супутники оптичного діапазону (Landsat 8, Sentinel-2, QuickBird) конструктивно містять мультиспектральні сенсори з відносно низькою або середньою просторовою розрізненістю (наприклад, 30 м для Landsat 8) та окремий панхроматичний сенсор, який акумулює випромінювання у широкому діапазоні видимого і ближнього інфрачервоного світла, забезпечуючи значно вищу геометричну розрізняльну здатність (15 м для Landsat, 0,61 м для QuickBird).

Таблиця 4.1 – Синтез багатоспектральних даних

Комбінація (R-G-B)	Сенсор	Інтерпретація та характеристика композиту
3-2-1	Landsat 5, 7	Природні кольори. Канали видимого діапазону. Здорова рослинність виглядає зеленою, вода темною, дороги сірими. Оптимально для вивчення антропогенних об'єктів та стану водних мас.
4-3-2	Landsat 8, 9	Природні кольори. Аналог комбінації 3-2-1 для сучасних сенсорів OLI.
4-3-2	Landsat 5, 7	Стандартні штучні (інфрачервоні) кольори. Близький ІЧ, червоний і зелений. Здорова біомаса має яскраво-червоний відтінок через сильне відбиття в NIR, забудова – блакитний. Ідеально для моніторингу рослинності.
5-4-3	Landsat 8, 9	Стандартні штучні кольори. Аналог комбінації 4-3-2 попередніх місій Landsat.
7-5-3	Landsat 8, 9	Комбінація SWIR, NIR та зеленого. Забезпечує відмінну візуалізацію крізь дим та атмосферний пил. Рослинність яскраво-зелена, відкритий ґрунт – рожевий або пурпуровий. Використовується в геології та агрономії.
7-6-4	Landsat 8, 9	Короткохвильові канали SWIR та червоний. Підкреслює вологість ґрунтів, виділяє згарища (яскраво-червоні або жовті) та урбанізовані території (фіолетові відтінки).

Математична процедура просторового злиття, відома як паншарпенінг (Panchromatic Sharpening), переносить геометричну деталізацію панхроматичного знімка на колірну площину багатоспектрального зображення.¹ У програмному комплексі Erdas Imagine ця процедура ініціюється через модуль Resolution Merge. Існує кілька класичних

алгоритмів трансформації: IHS (Інтенсивність-Відтінок-Насиченість), метод головних компонент (Principal Component) та перетворення Брові (Brovey Transform). Наприклад, алгоритм Brovey оптимізує контрастність шляхом математичної нормалізації значень багатоспектральних каналів і множення їх на яскравість пікселя панхроматичного знімка. Злиття з використанням білінійної інтерполяції або кубічної згортки гарантує отримання зображення високої чіткості, що зберігає початкові спектральні характеристики об'єктів.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 5

РОЗРАХУНОК СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ ТА ХМАРНІ ОБЧИСЛЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ДАНИХ

Завдання. Використовуючи програми QGIS або ESA SNAP, обчисліть нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) за допомогою калькулятора каналів та застосуйте палітру псевдокольників для візуальної оцінки стану фітомаси. Далі, у середовищі Google Earth Engine, виконайте просторово-часове фільтрування колекцій знімків, створіть безхмарну мозаїку, обчисліть додаткові спектральні індекси (наприклад, EVI, SAVI або MNDWI) та експортуйте готові результати на Google Drive.

Методика виконання

Спектральний індекс – це оптимізований кількісний показник, що обчислюється як алгебраїчна комбінація яскравостей у різних спектральних діапазонах з метою підсилення корисного сигналу від об'єкта (рослинності, води, ґрунту) та нівелювання негативних впливів атмосфери, рельєфу чи тіней.

Фундаментальним індикатором у біологічних та агрономічних дослідженнях є Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI). Його фізичний зміст базується на спектральній контрастності: хлорофіл у клітинах судинних рослин інтенсивно поглинає видиме червоне світло (0,63-0,69 мкм) для фотосинтезу, тоді як губчаста структура мезофілу відбиває до 50% ближнього інфрачервоного випромінювання NIR (0,76-0,90 мкм). Математично індекс обчислюється як нормалізована різниця:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}, \quad (5.1)$$

Значення індексу варіюються від -1,0 до +1,0. Водні об'єкти, що поглинають NIR, демонструють від'ємні значення, ділянки відкритого ґрунту мають індекс близько нуля (0,1–0,2), тоді як території з густою, здоровою фітомасою сягають значень 0,6–0,9. В аналітичних програмах (таких як QGIS через Band Calc або SNAP через Band Maths) результат розрахунку формує одноканальне растрове зображення, гістограма якого підлягає ретельній оцінці, а також застосуванню палітр псевдокольників для візуалізації стресу рослинності.

Для компенсації впливу атмосферних аерозолів застосовується Підсилений вегетаційний індекс (EVI), який модифікує рівняння NDVI шляхом введення синього каналу (Blue) для стабілізації червоного:

$$EVI = G \frac{NIR-RED}{NIR+C_1 \cdot RED-C_2 \cdot BLUE+L}, \quad (5.2)$$

де G – масштабний коефіцієнт (зазвичай 2,5),
 L – фактор корекції фону ґрунту (1,0), а
 C_1 (6,0) та C_2 (7,5) – коефіцієнти атмосферного розсіювання.¹

Аналогічно обчислюється Ґрунтово-орієнтований вегетаційний індекс (SAVI), що використовує фактор $L=0,5$ для мінімізації впливу відкритого ґрунту в умовах розрідженого рослинного покриву. Для моніторингу гідрологічних характеристик ефективним є Модифікований нормалізований водний індекс (MNDWI), який обчислюється за нормалізованою різницею між зеленим (Green) та середнім інфрачервоним (SWIR) каналами.

Виконання глобальних та ресурсомістких розрахунків індексів над великими масивами даних значно спрощується завдяки платформі хмарних обчислень Google Earth Engine (GEE). GEE забезпечує доступ до петабайтів багатоспектральних даних і потужностей серверів Google через JavaScript API. Робочий процес (Code Editor) передбачає:

1. Завантаження колекцій зображень (ImageCollection), наприклад, `ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_HARMONIZED')`.
2. Просторове і часове фільтрування колекцій за допомогою методів `.filterBounds(geometry)`, `.filterDate('2022-01-01', '2023-01-01')` та `.filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 30))` для видалення хмарних сцен.
3. Створення мозаїк і композитів. Функція `.median()` генерує синтезоване зображення, де кожному пікселю присвоюється медіанне значення з усього відфільтрованого часового стека, що ідеально видаляє випадкові перешкоди.
4. Обчислення індексів «на льоту». Вбудована функція `image.normalizedDifference()` автоматизує розрахунок NDVI, а метод `.expression()` дозволяє вводити складні алгебраїчні формули (наприклад, SAVI), перемножуючи значення пікселів (DN) на відповідні масштабні коефіцієнти конвертації (для Sentinel-2 масштабний множник становить 0,0001).
5. Експорт даних на Google Drive за допомогою команди `Export.image.toDrive`, із зазначенням регіону вивантаження та роздільної здатності.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 6

ТЕМАТИЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Завдання. Виконайте класифікацію растрового зображення шляхом автоматичної кластеризації з подальшим експертним перекодуванням виділених спектральних груп у макрокласи земного покриття. Після цього здійсніть класифікацію, попередньо сформувавши репрезентативні навчальні вибірки (ROI) для визначених типів об'єктів, застосуйте відповідне правило прийняття рішень та проаналізуйте точність результату за допомогою матриці помилок.

Методика виконання

Класифікація – це ключовий математичний апарат тематичної обробки, який здійснює сегментацію пікселів неперервного багатовимірного растрового зображення на дискретні категорії (класи земного покриття) на основі подібності їхніх спектральних характеристик. Технологічно виокремлюють некеровану (Unsupervised) та керовану (Supervised) класифікацію.

Некерована класифікація (кластеризація)

Некерована класифікація застосовується в умовах браку або повної відсутності апріорної інформації про досліджувану територію. Алгоритм виконує автоматичне статистичне розбиття пікселів на спектрально однорідні групи – кластери. Популярними є алгоритми K-Means (K-середніх) та ISODATA. У програмах Erdas Imagine та SNAP користувач задає лише очікувану кількість кластерів (наприклад, 10-15) та граничну кількість ітерацій.

Ітераційний процес стартує з випадкового розміщення центрів кластерів у багатовимірному просторі ознак. Кожен піксель приєднується до того кластера, до якого спектральна відстань є найменшою. Після розподілу всіх пікселів координати центрів кластерів перераховуються, і процес повторюється. Перерахунок триває доти, доки не буде досягнуто заданого порогу збіжності (Convergence Threshold) – наприклад, 0,98 (тобто 98% пікселів стабільно зберігають свою приналежність на новій ітерації) або до вичерпання ліміту ітерацій.

Після автоматичної сегментації здійснюється експертний аналіз кластерів: використовуючи інструменти порівняння зі шторкою (Swipe), дослідник ідентифікує, яким об'єктам реальної поверхні відповідають цифрові кластери, та застосовує процедуру тематичного перекодування (Thematic Recode), об'єднуючи спектрально подібні кластери у фізичні макрокласи (наприклад, вода, ліс, відкритий ґрунт) та присвоюючи їм відповідні кольори і назви в атрибутивній таблиці.

Керована класифікація

Керована класифікація передбачає «навчання» системи: оператор заздалегідь визначає типи земного покриття та формує для них бібліотеки спектральних еталонів – навчальні вибірки або полігони областей інтересу (ROI, Regions of Interest).

У модулі SCP (QGIS) або Signature Editor (Erdas Imagine) створення ROI може виконуватися вручну інструментами полігонального малювання або автоматично за алгоритмом «вирощування регіонів» (Region Growing) з опорної точки. Умовою додавання сусідніх пікселів до еталона є спектральна евклідова відстань (Spectral Euclidean Distance), значення якої визначає ступінь однорідності створюваного полігону. Після відбору репрезентативних пікселів для всіх класів програма розраховує статистичні параметри їх спектральних сигнатур (математичне сподівання, дисперсія). Візуалізація сигнатур на Графіку спектральних кривих (Spectral Signature Plot) дозволяє оцінити їх перетин: наприклад, клас «забудова» часто спектрально перетинається з класом «відкритий ґрунт» через подібність їхніх матеріалів у видимому спектрі, що вимагає коригування вибірок.

Розподіл решти пікселів зображення за еталонами здійснюється за допомогою правил прийняття рішень (Decision Rules):

Метод мінімальної відстані (Minimum Distance): обчислює відстань від пікселя до спектрального центру кожного еталона; піксель зараховується до найближчого класу.

Правило паралелепіпеда (Parallelepiped): непараметричний алгоритм, що формує межі гіперкубів за екстремумами дисперсії сигнатури в кожному каналі.

Метод максимальної правдоподібності (Maximum Likelihood): параметричний алгоритм, що базується на припущенні про нормальний гауссівський розподіл яскравостей. На основі середнього значення та коваріаційної матриці обчислюється статистична ймовірність належності пікселя до кожного класу; піксель відноситься туди, де ця ймовірність максимальна.

Картографування спектрального кута (Spectral Angle Mapping, SAM): порівнює n-вимірні вектори пікселів, розраховуючи кут між ними, що дозволяє нівелювати вплив зміни яскравості від рельєфних тіней.

Для оцінки якості керованої класифікації генеруються файли відстаней (де яскравість пікселя прямо пропорційна відстані до центру призначеного класу, що індикує можливу похибку) та матриці помилок (Confusion Matrix), які розраховують індекс Каппа та загальну точність категоризації.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 7

РАДІОЛОКАЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ТА КОМПЛЕКСНА ОБРОБКА РАДАРНИХ ДАНИХ

Завдання. Проведіть комплексну обробку сирих радарних даних Level-1 GRD у програмі SNAP, послідовно виконавши процедури радіометричного калібрування, придушення спекл-шуму, логарифмічного перетворення та геометричної корекції рельєфу. На основі відкаліброваних поляризаційних каналів створіть RGB-комполит для візуальної ідентифікації та просторового аналізу різних типів земного покриття.

Методика виконання

Радіолокаційні системи із синтезованою апертурою (Synthetic Aperture Radar – SAR), на відміну від пасивних оптичних сенсорів, є активними пристроями. Вони самостійно генерують мікрохвильові імпульси та вимірюють інтенсивність і фазу відбитого сигналу (backscatter). Робоча довжина хвилі мікрохвильового діапазону (наприклад, С-діапазон, 5,405 ГГц, $\approx 5,5$ см, що використовується супутниками Sentinel-1A) забезпечує безперешкодне проходження випромінювання крізь хмарність і атмосферні аерозолі, гарантуючи отримання зображень вдень та вночі за будь-яких метеоумов.

Принцип дії полягає у вимірюванні амплітуд імпульсів та їх когерентному підсумовуванні: під час переміщення по орбіті супутник реєструє відбиття від однієї ділянки в різні моменти часу. Алгоритмічний синтез цієї інформації дозволяє сформувати віртуальну (синтезовану) антену, просторова розрізненість якої не залежить від фізичної довжини антени носія. Зображення поверхні формуються з величин модулів комплексного коефіцієнта зворотного розсіювання. Інтенсивність відбитого сигналу детермінується діелектричною проникністю матеріалу (вмістом води) та геометричною шорсткістю поверхні (наприклад, гладка водна поверхня відбиває сигнал дзеркально від сенсора, тому на знімках вона виглядає чорною).

Комплексна обробка радарних продуктів типу Level-1 GRD (Ground Range Detected) реалізується у спеціалізованому програмному пакеті SNAP (Sentinel Application Platform) за наступним алгоритмом:

- 1. Радіометричне калібрування (Radiometric Calibration).** Цифрові значення амплітуд у сирому знімку не мають прямого фізичного змісту. Калібрування перетворює інтенсивність зворотного розсіювання на нормовану радарну площу розсіювання ($\text{Sigma}_0 - \sigma_0$), враховуючи кут падіння імпульсу та калібрувальні коефіцієнти сенсора. Ця операція є критичною для кількісного багаточасового аналізу. Відкалібрований продукт містить канали у різних поляризаціях (горизонтально-вертикальній VH та вертикально-вертикальній VV).

2. **Спекл-фільтрація (Speckle Filtering).** Через когерентну природу лазерного та мікрохвильового випромінювання виникають інтерференційні шуми у вигляді зернистості, які називаються спеклом. Для їх придушення використовуються адаптивні просторові фільтри. Фільтр Lee або вдосконалений Refined Lee із вікном розміром 3×3 або 5×5 пікселів виконує усереднення яскравості на гомогенних ділянках, зберігаючи при цьому чіткість контрастних меж і лінійних об'єктів.
3. **Логарифмічне масштабування (Linear to/from dB).** Значення σ_0 у лінійній шкалі охоплюють занадто широкий динамічний діапазон (від часток одиниці до тисяч), що робить візуальну інтерпретацію неефективною. Застосування функції 10-го логарифма переводить значення у шкалу децибелів (dB). Це перетворення підвищує контрастність зображення: яскраві значення стискаються до середніх, а темні – розтягуються.
4. **Геометрична корекція рельєфу (Range-Doppler Terrain Correction).** Радар фіксує об'єкти на основі похилої дальності, що призводить до специфічних спотворень на ділянках зі складним рельєфом: скорочення схилів (foreshortening), радіолокаційне перекриття (layover) та формування радіолокаційної тіні (shadow). Інструмент корекції виправляє ці спотворення за допомогою цифрової моделі рельєфу (ЦМР), зокрема SRTM 3Sec (роздільна здатність 90 м) або SRTM 1Sec (30 м). Під час цієї процедури здійснюється ортотрансформування та репроекція даних у картографічну систему координат (WGS84 або UTM) із заданим кроком пікселя.
5. **Створення поляриметричних RGB композитів.** Різні поляризації по-різному відбиваються від фізичних об'єктів (наприклад, VV домінує при відбитті від голої землі, VH – при об'ємному розсіюванні у кронах дерев). Для інтуїтивно зрозумілої візуалізації поляризаційні канали комбінуються в RGB зображення. Комбінація розраховується через модуль Band Maths:

Red = Sigma0_VV_db,
Green = Sigma0_VH_db,
Blue = Sigma0_VH_db - Sigma0_VV_db

Даний композит ефективно маркує водні об'єкти темними кольорами, ліси та сільськогосподарські угіддя – зеленими відтінками, а урбанізовані території, де відбувається сильне подвійне відбиття від стін будівель, – яскраво-білим або жовтим кольорами.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Виверження вулкану Ейяфйотль, зроблена 17 квітня 2010 р. Фотографія Drni FriDriksson. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Eyjafjallaj%C3%B6kull#/media/File:%20Eyjafjallajokull-April%2017.JPG> (дата звернення: 12.03.2026).
2. Виверження вулкану Ейяфйотль на знімку MODIS, знятого 17 квітня 2010 р. URL: https://www.nasa.gov/images/content/445797main_Iceland_A2010107.1320.250m (дата звернення: 18.03.2026).
3. Готинян В. С., Арістов М. В., Томченко О. В., Миколенко Л. І. Геодинамічне районування території Київської області з використанням космічних знімків (для аналізу полігонів захоронення відходів). Київ : ДНВЦ «Природа». URL: <http://www.pryroda.gov.ua/index.php?newsid=57> (дата звернення: 02.04.2026).
4. Доманська М. В., Боднар С. П. Ідентифікація несанкціонованих звалищ побутових відходів за матеріалами ДЗЗ. *Часопис картографії*. 2013. Вип. 7. С. 114-126.
5. Інтерактивна мапа сміттєзвалищ. URL: <https://ecomapa.gov.ua/> (дата звернення: 08.03.2026).
6. Кучма Т. Л. Картографування нафтових розливів у Чорному та Азовському морях за даними дистанційного зондування Землі. *Вісник геодезії та картографії*. 2006. № 2. С. 26-29.
7. Системи сповіщення про вулкани (Volcanic Alert System). URL: <http://sacs.aeronomie.be> (дата звернення: 08.03.2026).
8. Система сповіщення про вулкани NOAA/NESDIS. URL: <https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/vaac> (дата звернення: 08.03.2026).
9. Тішаєва А. М., Томченко О. В. Локалізація та виявлення закономірностей просторового розміщення сміттєзвалищ на території Київської області за даними ДЗЗ. *Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях* : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, Пуща-Водиця, 03-06 жовт. 2016 р.) / за заг. ред. С. О. Довгого. Київ : Юстон, 2016. С. 105-109.
10. Bello O., Aina Y. Satellite remote sensing as a tool in disaster management and sustainable development: towards a synergistic approach. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 120. P. 365-373. DOI: 10.1016/j.sbspro. 2014.02.114.
11. Kaufman Y. J., Justice C. O., Flynn L. P., Kendall J. D., Prins E. M., Giglio L., Ward D. E., Menzel W. P., Setzer A. W. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* no. 1998. D24. P. 32215-32238.
12. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O. The collection MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 178. P. 31-41.

13. NASA/GSFC/LaRC/JPL-Caltech, MISR Team. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA11218> (дата звернення: 19.03.2026).
14. The Fire Information for Resource Management System – Інформація про пожежі для системи управління природними ресурсами. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map> (дата звернення: 04.04.2026).
15. Global Wildfire Information System – Глобальна інформаційна система пожеж. URL: http://gwis.jrc.ec.europa.eu/static/gwis_current_situation/public/index.html (дата звернення: 06.04.2026).
16. Falconieri A., Cooke M. C., Filizzola C., Marchese F., Pergola N., Tramutoli V. Comparing Two Independent Satellite-Based Algorithms for Detecting and Tracking Ash Clouds by Using SEVIRI Sensor. *Sensors*. 2018. Vol. 18. P. 369.
17. Sentinel-5P captures bali volcanic eruption. URL: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/12/Sentinel5P_captures_Bali_vol (дата звернення: 06.04.2026).
18. Global Volcanism Program, 2013. Volcanoes of the World, V. 4.7.4. / Venzke E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 23 Oct. 2018. URL: <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>.
19. Sang-Ho Yun. The effect of DESDynI mission on volcano deformation modeling. *Procedings Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry (ESA ESRIN)*, 30th Nov.–4th Dec. 2009, Frascati, Italy. URL: https://earth.esa.int/workshops/fringe09/participants/483/pres_483_Yun.pdf (дата звернення: 12.04.2026).
20. Ferraro G., Tarchi D., Fortunu Jo., Sieber A. JRC Experience in the Field of Satellite Monitoring of Accidental and Deliberate Marine Oil Pollution. – Joint Research Centre, Via E. Fermi, 1, I-21020 ISPRA (VA) Italy, 2004. URL: <http://serac.jrc.it/midiv/pdf/eurisy.pdf>. (дата звернення: 12.04.2026).
21. ESA-IAF report on the ERUNET project (European-Russian-Ukrainian GMES Network for Monitoring of Oil Spills and Oil & Gas Pipelines). 2006. P.82.
22. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата звернення: 12.04.2026).
23. Kochan ., PohrebennykV., KvaterniukS., PetrukR., KvaterniukO., BernasM., SzklarczyR., ZiubinaR. Multispectral Control of Ecotoxicity of Waters Using Duckweed (Lemna Minor). *The 5th IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems* (Dortmund, Germany, 17-18 Sept., 2020). Dortmund? 2020. P. 151-155.
24. Kvaterniuk S., Petruk V., Kochan O., Frolov V. Multispectral ecological control of parameters of water environments using quadrocopter. Sustainable Production: Novel Trends in Energy, Environment and Material Systems. Studies in Systems, Decision and Control: monograph / editors: G. KrDlczyk, M. Wzorek., A. KrDl, O. Kochan, J. Su, J. Kacprzyk. Cham : Springer, 2020. Vol. 198. P. 75-89.

Електронне навчальне видання

Сергій Михайлович Кватернюк

**Методичні вказівки до виконання практичних робіт
з дисципліни «Дистанційне зондування Землі»
зі спеціальності «Технології захисту навколишнього
середовища»**

Рукопис оформив: С. Кватернюк

Редактор: Г. Суровенко

Оригінал-макет виготовлено в РВВ ВНТУ

Підписано до видання 30.07.2026

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2026-102.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,

Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95,

м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

Email: rvv.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК No 3516 від 01.07.2009 р.