Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
(інститут)
Факультет інформаційних технологій
(факультет)
Кафедра інформаційних систем та технологій та комп'ютерної інженерії
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Турчиної Інесси Геннадіївни
(ПІБ)
академічної групи 126м-22з-1
(шифр)
спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
(код і назва спеціальності)
за освітньо-професійною програмою 126 Інформаційні системи та технології
(офіційна назва)
на тему «Комп'ютерна технологія моніторингу стану лісового покриву природного заповідника "Древлянський" за даними Sentinel-2»
(назва за наказом ректора)

Керівники	**Прізвище, ініціали**	**Оцінка за шкалою**		**Підпис**
		рейтинговою	**інституційною**	
кваліфікаційної роботи	доц. Каштан В.Ю.			
розділів:				
Рецензент				
Нормоконтролер	проф. Коротенко Г.М.			

Дніпро
2023

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
інформаційних технологій
та комп'ютерної інженерії
(повна назва)
_____ Гнатушенко В.В.
(підпис) (прізвище,ініціали)

«_» _____ 202_ року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня магістр

студенту Турчиной І.Г. **академічної групи** 126м-22з-1
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
за освітньо-професійною програмою 126 Інформаційні системи та технології
(офіційна назва)

на тему «Комп'ютерна технологія моніторингу стану лісового покриву природного заповідника "Древлянський" за даними Sentinel-2»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 09.10.2023 р. .№ 1228-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Розділ 1	На основі матеріалів виробничих практик, інших науково-технічних джерел сформулювати наукове завдання, конкретизувати предмет та мету досліджень	09.10.2023
Розділ 2	Обґрунтувати теоретичну базу розв'язання наукового завдання, якому присвячено роботу	25.10.2023
Розділ 3	Експерементальні дослідження. Підготовка матеріалів для захисту роботи	20.11.2023

Завдання видано _____ доц. Каштан В.Ю.
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)
Дата видачі 06 вересня 2023р.
Дата подання до екзаменаційної комісії _____
Прийнято до виконання _____ Турчина І.Г.
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 64 с., 14 рис., 4 табл., 20 джерел, 2 додаток.

Об'єкт дослідження: супутникові знімки Sentinel-2 для моніторингу стану лісового покриву природного заповідника "Древлянський".

Предмет дослідження: моделі виявлення місць змін у лісовому покриві на території природного заповідника "Древлянський".

Мета кваліфікаційної роботи: розробка методики моніторингу стану лісового покриву природного заповідника "Древлянський".

Кваліфікаційна робота присвячена актуальній задачі розробки технології моніторингу стану лісового покриву на основі обробки та аналізу даних дистанційного зондування та геоінформаційних методів. Розроблено комп'ютерну технологію за допомогою якої було виявлено та здійснено аналіз змін у лісовому покриві заповідника. Це дозволило виявити та визначити природні та антропогенні фактори, які впливають на цю екосистему.

Наукове дослідження полягає у використанні різних методів класифікації (контрольованої та неконтрольованої), а також методів класифікації усохлих деревостанів на основі PCA та K-means для детального аналізу лісового покриву та виявлення змін.

Практичне значення роботи полягає в тому, що результати дослідження можуть бути впровадженні в процеси ведення державного кадастру, комплексного обстеження, оцінки природних ресурсів та характеристик лісів і природоохоронних територій. Ці дані становлять цінний внесок у науково-прикладну сферу, надаючи засоби для здійснення інформованих рішень та ефективного управління природними ресурсами та екосистемами.

Ключові слова: ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ (ДЗЗ), СУПУТНИКОВИЙ ЗНІМОК, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ (ГІС), МОНІТОРИНГ ЛІСІВ, КОМП’ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, SENTINEL-2, ЧАСОВІ РЯДИ

ABSTRACT

The explanatory statement has 64 p., 14 figures, 4 tables, 20 sources, and 2 appendix.

Object of research: Sentinel-2 satellite images for monitoring the forest cover of the Drevlyansky nature reserve.

Subject of research: patterns of changes in the forest cover in the territory of the Drevlyansky nature reserve.

The purpose of the diploma project: development of a methodology for monitoring the forest cover of the Drevlyansky natural reserve.

The qualified robot is dedicated to the current task of developing technology for monitoring the forest cover based on the processing and analysis of remote sensing data and geoinformation methods. Computer technology was expanded to help identify and analyze changes in the forest cover of the reserve. This made it possible to reveal the importance of natural and anthropogenic factors that flow into this ecosystem.

The research involves using various classification methods (supervised and unsupervised), as well as PCA and K-means-based methods for classifying dried stands to analyze forest cover in detail and identify changes.

The practical significance of the results of the work lies in the fact that the results of this research can be used for the processes of maintaining a state cadastre, complex survey, assessment of natural resources and characteristics of forests and environmental territories.

Keywords: REMOTE SENSING (RS), SATELLITE IMAGING, GEOINFORMATION SYSTEMS (GIS), LIS MONITORING, COMPUTER MODELING, SENTINEL-2, CLOCK SERIES

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 8

ВСТУП 9

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ 11

1.1 Моніторинг лісових ресурсів 11

1.2. Структура лісового фонду природного заповідника "Древлянський" 14

1.3. Використання дистанційних методів та ГІС-технологій для моніторингу лісових ресурсів 16

1.4 Висновки 25

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ 26

2.1 Методи аналізу земного покриву 26

2.1.1 Дистанційне зондування землі 26

2.1.2 Методи аналізу земельного покриву на основі супутникових знімків 30

2.2 Методи моніторингу та аналізу змін у земельному покриві 33

2.3 Літературний огляд популярних методів моніторингу стану лісового покриву 35

2.4 Висновки 37

3 РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ПРИРОДНОГО ЗАПОВІДНИКА "ДРЕВЛЯНСЬКИЙ" 39

3.1 Методика моніторингу стану лісового покриву 39

3.2 Програмне забезпечення комп'ютерної технології 46

3.3 Виявлення та аналіз змін лісового покриву заповідника "Древлянський" 50

3.4 Висновки 56

ВИСНОВКИ 57

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 58

ДОДАТОК А 61

ДОДАТОК Б 64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ГІС – геоінформаційна система.

FAO – продовольча та сільськогосподарська організація ООН.

PCA – аналіз головних компонент.

MLC – класифікації максимальної правдоподібності.

RF – Random Forest.

SVM – опорних векторних точок.

ANN – нейронні мережі.

DT – дерева рішень.

LULC – картографування земельного покриву.

NDVI – нормалізований індекс вегетації.

RVI – індекс відбиття червоного світла.

GRVI – індекс зеленого відбиття.

ВСТУП

Ситуація з лісовими ресурсами в Україні не відповідає сучасним еколого-економічним вимогам суспільства. Надмірне використання лісів, несанкціонована вирубка, а також втрата лісових територій під неекологічні цілі спричиняють загальне погіршення ситуації. Отримання і обробка даних про ліси не відповідають потребам управління природними ресурсами. Не визначено ефективні методи моніторингу, контролю та управління лісовими масивами на різних рівнях управління. Узгодженість процедур, форматів, термінів та обмін інформацією між органами влади щодо цих питань відсутня. Інформаційна база про кількість, якість та стан лісових ресурсів не відповідає потребам управління. Щоб вирішити ці проблеми, потрібно створити ієрархічну систему управління та інформаційного забезпечення, яка б відображала різні рівні управління належним чином.

В Україні поки не створено державної програми для дистанційного моніторингу лісів, тому зараз спостереження проводяться в основному на місцях. Впровадження технологій дистанційного моніторингу може спростити інвентаризацію, знизити витрати та майже усунути вплив суб'єктивних факторів. Використання розвинутої геоінформаційної системи, побудованої на базі даних від дистанційного зондування, може стати потужним інструментом для швидкого та точного аналізу інформації, необхідної для прийняття управлінських рішень на будь-якому рівні управління.

Об’єктом досліджень є супутникові знімки Sentinel-2 для моніторингу стану лісового покриву природного заповідника "Древлянський".

Предметом дослідження – моделі виявлення місць змін у лісовому покриві на території природного заповідника "Древлянський".

.

Мета роботи – розробка методики моніторингу стану лісового покриву природного заповідника "Древлянський".

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідження сучасного стану лісового покриву природного заповідника "Древлянський";
- аналіз можливостей використання методів дистанційного зондування Землі для моніторингу лісів;
- отримання супутникових даних, їх попередня обробка, радіометричне калібрування та атмосферна корекція;
- виконання алгоритмів неконтрольованої та контрольованої класифікації знімків Sentinel-2 для дослідження стану та незаконних вирубок лісів;
- застосування апарату вегетаційних індексів для моніторингу використання лісового покриву.

Наукова новизна результатів дослідження полягає у використанні різних методів класифікації (контрольованої та неконтрольованої), а також методів класифікації усохлих деревостанів на основі PCA та K-means для детального аналізу лісового покриву та виявлення змін.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ

1.1 Моніторинг лісових ресурсів

Лісові ресурси українських територій належать до важливих компонентів природи, які відіграють значну роль у різних аспектах життя. Понад 15,7% території країни покриті лісами, і вони переважно сконцентровані в Поліссі на півночі та у Карпатах на заході. Ці ліси є не лише джерелом цінних природних ресурсів, але й важливими для збереження вуглецю, підтримання біорізноманіття та виконання ряду екологічних функцій.

Моніторинг стану лісів в Україні вимагає систематичного спостереження та оцінки їх динаміки під впливом природних і антропогенних факторів, таких як пожежі, руйнування лісових масивів та техногенне забруднення. Стабільність та здоров'я лісів стає необхідною для збереження екологічної рівноваги та забезпечення стійкості екосистем.

Цінність лісів як ресурсу для національної економіки та збереження природи вимагає ретельного спостереження та розумного управління цими екосистемами.

Моніторинг полягає в систематичних і повторних спостереженнях різних аспектів природного середовища на певних територіях в різний час. Це важливий інструмент для збору даних про зміни в середовищі, аналізу стану екосистем та оцінки впливу різних факторів на природні ресурси. Ці моніторингові програми часто розробляються заздалегідь з метою вивчення певних аспектів природи та відслідковування змін з часом.

Геоінформаційний моніторинг використовує технології для автоматизації спостережень із застосуванням геопросторових даних та інших інформаційних ресурсів. Ця система базується на інтеграції даних з різних джерел, використанні моделей для аналізу і прогнозування стану

досліджуваних об'єктів у геопросторовому середовищі. Геоінформаційні системи, зокрема, дозволяють відображати, аналізувати й оцінювати дані про об'єкти за допомогою географічних карт і забезпечують можливість виконання моніторингових процедур більш ефективно та точно [1].

Моніторинг часто спрямований на попередження негативних наслідків, що можуть виникнути в результаті господарської діяльності людини. Це означає, що системи моніторингу природних ресурсів, екосистем, атмосфери, ґрунтів та інших об'єктів спрямовані на виявлення, контроль та попередження шкідливих впливів, наприклад, забруднення навколишнього середовища, деградації природних ресурсів чи змін клімату. Дані, зібрані під час моніторингу, можуть бути використані для прийняття рішень та розробки стратегій з метою запобігання негативним наслідкам господарської діяльності та збереження природних ресурсів.

Цей підхід дійсно важливий і перспективний для забезпечення належного управління лісовими ресурсами. Використання сучасних технологій, таких як дистанційне зондування, ГІС і навігаційні системи, дозволяє зібрати широкий обсяг інформації, аналіз якої допомагає у створенні деталізованих карт, оцінці змін в лісовому покриві, визначенні стану лісів та їх динаміки з часом. Ця інформація є важливою для розробки ефективних стратегій лісокористування, а також для захисту природного середовища. Інтеграція різноманітних даних дозволяє забезпечити більш точне і повне управління лісовими ресурсами і допомагає у вирішенні проблем екології та сталого лісового господарства.

Моніторинг лісів важливий для забезпечення належного управління цими екосистемами. Ця система спостережень, аналізу та прогнозування стану лісів дозволяє збирати актуальну інформацію про їх стан та динаміку змін з часом. Це надає можливість приймати обґрунтовані рішення щодо збереження, відновлення та раціонального використання лісових ресурсів, сприяє ефективному контролю за екосистемами лісів та плануванню їх використання відповідно до принципів сталого розвитку.

Моніторинг лісів має за мету забезпечити підвищення оперативності та якості збирання первинних даних про стан лісів, їхня обробка та представлення в формі інформаційних моделей. Це робить можливим зростання відповідності між реальним станом лісів та їх інформаційним відображенням. Результатом є підвищення обґрунтованості у прийнятті управлінських рішень з управління лісами та поліпшення якості доступу до цієї інформації для зацікавлених сторін за допомогою сучасних інформаційних та комп’ютерних технологій.

Завдання моніторингу лісів вкрай важливі для забезпечення сталого та ефективного управління цінними лісовими ресурсами. Забезпечення довгострокових спостережень дозволяє збирати об'єктивну та актуальну інформацію про стан лісів, виявляти чинники, які впливають на їхній стан, та прогнозувати зміни у лісових екосистемах. Це дає можливість аналізувати масштаби змін, виявляти причини погіршення стану лісів та розробляти стратегії для забезпечення їх стійкого функціонування.

Застосування інформаційно-аналітичної підтримки для управління лісами допомагає в прийнятті обґрунтованих рішень щодо збереження та раціонального використання лісових ресурсів.

Моніторинг - багаторівнева система спостережень. Виділяють два рівні моніторингу: I (екстенсивний) та II (інтенсивний). Екстенсивний моніторинг дозволяє визначити території, де відбуваються значні зміни, фіксуючи часову та просторову динаміку. В той час як інтенсивний моніторинг спрямований на глибше вивчення закономірностей динаміки лісів, аналізуючи причинно-наслідкові зв'язки та виявляючи ключові фактори, які впливають на стан лісів. Така система дозволяє не лише визначати динаміку, а й розуміти фактори, які її обумовлюють, що є критичним для ефективного управління та збереження лісових ресурсів.

Моніторинг лісів охоплює систему спостережень, оцінку та прогнозування стану та змін в лісовому фонді. Його цілі включають управління використанням, захистом та охороною лісів, їх відтворення та

підвищення екологічних функцій з метою забезпечення сталого управління цими ресурсами.

Завдання моніторингу лісів включають оцінку площ, виявлення впливу певних факторів (таких як вирубка, захворювання, пожежі), визначення коефіцієнта пожежної небезпеки, оцінку стану деревостану (з урахуванням віку тощо), вивчення листяного покриву та виявлення присутності шкідників і захворювань [2].

В Україні спостереження за станом лісів і досі проводиться наземними методами на ділянках моніторингу. Хоча має місце освоєння нових технологій інвентаризації лісів. Використання новітніх технологій, таких як лазерні далекоміри, супутникові навігаційні системи та польові комп'ютери, може значно полегшити та прискорити процес оцінки стану лісів, а також дозволить охопити більші території за короткий період часу. Це сприятиме більш ефективному управлінню лісовими ресурсами та підвищенню точності збору даних.

1.2. Структура лісового фонду природного заповідника "Древлянський"

Древлянський природний заповідник, розташований у Житомирській області України, є важливою ділянкою для збереження та дослідження унікальних природних екосистем. Заснований у 2009 році, цей заповідник є молодим у порівнянні з іншими, тому його наукові дослідження та систематизація даних щодо флори та фауни ще знаходяться в розвитку.

Головною метою його створення було збереження характерних природних ландшафтів регіону, таких як Полісся, а також захист ендемічних, реліктових видів тварин і рослин. Досягнення цих цілей сприяє збереженню та відтворенню природних лісів у цьому регіоні.

Незважаючи на молодість, важливе завдання – це налагодження систематичного вивчення заповідника, а також збільшення зусиль щодо

дослідження та документування біорізноманіття, що сприятиме кращому управлінню та збереженню унікальних екосистем цієї території.

Древлянський природний заповідник, який зараз перебуває у фазі збереження та відновлення, представляє величезну цінність для дослідження природних процесів. Його особлива цінність полягає у тому, що в цих лісах не проводились комерційні рубки після аварії на Чорнобильській АЕС. Це дозволяє відслідковувати та досліджувати природні процеси, що відбуваються в умовах, де людський вплив на природу мінімальний.

Така унікальна ситуація створює сприятливі умови для відновлення та розвитку різноманітних форм життя. У заповіднику можна спостерігати різноманітні види фауни та флори, включаючи таких хижаків, як рись і вовк, а також лося та інші види. На цій території зафіксовано значну кількість видів: 516 видів фауни та 973 види флори.

Розподіл біотопів заповідника за площею є специфічним: ліси – 54,68 % площі, і вона буде збільшуватися з часом за рахунок спонтанного та штучного заліснення перелогів; луки – 34,58 %, в т.ч. сіножаті – 14,66 %, пасовища – 19,92 %. Заповідник характеризується значною участю перелогів (7,87 %) та земель населених пунктів (2,75 %), відселених та закинутих внаслідок значного радіоактивного забруднення. Невелика частка площі заповідника представлена заболоченими землями та чагарниками – 0,05 та 0,07 % відповідно.

Крім того, важливою є відсутність масових захворювань і поширення шкідників, які часто відбуваються після рубок. Це ще раз підтверджує можливість природи до самовідновлення та саморегуляції, демонструючи, як екосистеми можуть відновлюватися в умовах, де вони не піддаються значному антропогенному впливу.

Нажаль на території заповідника за останні роки було декілька серйозних пожеж. У 2020 році пожежа спалахнула через надзвичайно суху

погоду та сильний вітер, що сприяло швидкому поширенню вогню. Незважаючи на зусилля ліквідації, пожежу не вдалося повністю приборкати.

Пожежа охопила понад 6 тисяч гектарів території заповідника, включаючи найбільш радіоактивно забруднені ділянки. Це викликало занепокоєння через можливе поширення радіації, особливо у зоні Чорнобильської аварії. Хоча шкоду для людей не рахували, при ліквідації пожежі всі пожежники та лісівники, ймовірно, отримали певну дозу радіації.

Також в результаті ракетно-бомбових ударів, згідно з довідкою дирекції заповідника, вогнем було знищено понад 2100 гектарів лісових насаджень, чим завдано непоправної шкоди природно-заповідному фонду України – об’єктам, які мають особливу природоохоронну, наукову, естетичну, рекреаційну та іншу цінність і виділені з метою збереження природної різноманітності.

Ці події підкреслюють важливість заходів з попередження пожеж та керування ними на таких унікальних територіях, особливо враховуючи радіаційні ризики та їх можливі наслідки.

1.3. Використання дистанційних методів та ГІС-технологій для моніторингу лісових ресурсів

Методи використання даних з супутників для моніторингу лісів отримали інтенсивний розвиток на початку 70-х років двадцятого століття. Цей напрям досліджень став особливо активним в ряді технічно розвинених країн, зокрема, у США, Канаді, Франції, Німеччині, Швеції, Фінляндії.

Українські дослідження з використання даних супутникових спостережень для вирішення завдань лісового господарства та лісознавства почали проводитися з кінця 90-х років двадцятого століття. Ці дослідження дозволяли вивчати динаміку лісового покриву, оцінювати зміни у розмірах лісових масивів, а також використовувати ці дані для прийняття рішень у

сфері лісового господарства та охорони навколишнього середовища. У 1995 році було запущено перший український науково-дослідницький супутник «Січ-1».

Для проведення експериментальних робіт була створена експериментальна база даних по характеристиках лісів для оцінки можливостей дистанційного зондування. Висока роздільна здатність даних, яка була виявлена як важливий фактор для розв'язання завдань лісовпорядкування та картографування, вказує на те, що деталізована інформація є ключовою для точного визначення стану лісів і вирішення їх проблем.

Особливо цікаво, що дослідження включало аналіз можливостей розпізнавання лісових форм та об'єктів у різні сезони року, виявлення вирубок, лісових пожеж і контроль їх динаміки. Це підкреслює важливість не лише визначення статичних параметрів лісів, але й відслідковування змін, які відбуваються з часом.

Ці дослідження можуть мати значний вплив на розвиток систем моніторингу лісів та управління їхніми ресурсами [3].

Розвиток автоматизованих систем обробки інформації про ліси допоміг значно поліпшити спосіб аналізування даних, отриманих з супутників, та їх використання для різноманітних цілей.

Зокрема, розроблення методів для виявлення пожеж та контролю їхньої динаміки, картографування снігового покриву, а також вивчення метеорологічних умов та оцінка територій, що були піддані пожежам, свідчить про широкий спектр можливостей, які надає дистанційне зондування для моніторингу та захисту лісів.

Це може допомогти вчасно реагувати на загрози, які походять від пожеж, погодних умов та інших факторів, що впливають на стан лісів. Такий

прогрес в технологіях дистанційного зондування відкриває широкі можливості для ефективного управління та охорони лісових ресурсів.

Використання дистанційного зондування значно вдосконалило методи картографування лісового покриву та виявлення змін в лісах. Важливо зазначити, що тропічні ліси, які є домінантними в багатьох країнах Південної Америки, Африки та Азії, стали об'єктом особливого інтересу через їхню велику екологічну важливість та постійний вплив людської діяльності.

Засоби супутникового спостереження дозволяють не лише оцінювати зміни в розподілі лісового покриву, але й виявляти втрату лісів через вирубку, зміни природних умов чи інші фактори. Це надає можливість урядам та науковцям розуміти, які саме ділянки потребують уваги для збереження природних ресурсів та здоров'я екосистем.

І це чудовий приклад, як технології дистанційного зондування використовуються для вирішення найбільш актуальних екологічних проблем, зокрема, зниження обсягів лісостану та збереження різноманітності екосистем.

Супутникові дані високого просторового розділення, які надаються такими місіями, як Landsat та Sentinel, виявляються надзвичайно корисними для деталізованого вивчення лісів на локальному рівні. Особливо це стосується оцінки змін, вивчення їхньої структури, виявлення дефорестації чи масштабних вирубок.

Ці дані дозволяють виявити маленькі зміни у лісовому покриві, включаючи втрати чи зміни на невеликих територіях. Вони стають невід’ємним інструментом для моніторингу лісів, щоб виявляти та відстежувати незначні зміни, які можуть мати велике значення для збереження та управління лісовими ресурсами.

Згідно сучасної концепції супутникового моніторингу лісів, спостереження різняться за кількома параметрами. Ці різновиди

відрізняються за завданнями, що ставляться перед ними, територією, яку вони охоплюють, цілями та необхідністю деталізації одержуваної інформації за просторовими та тематичними характеристиками.

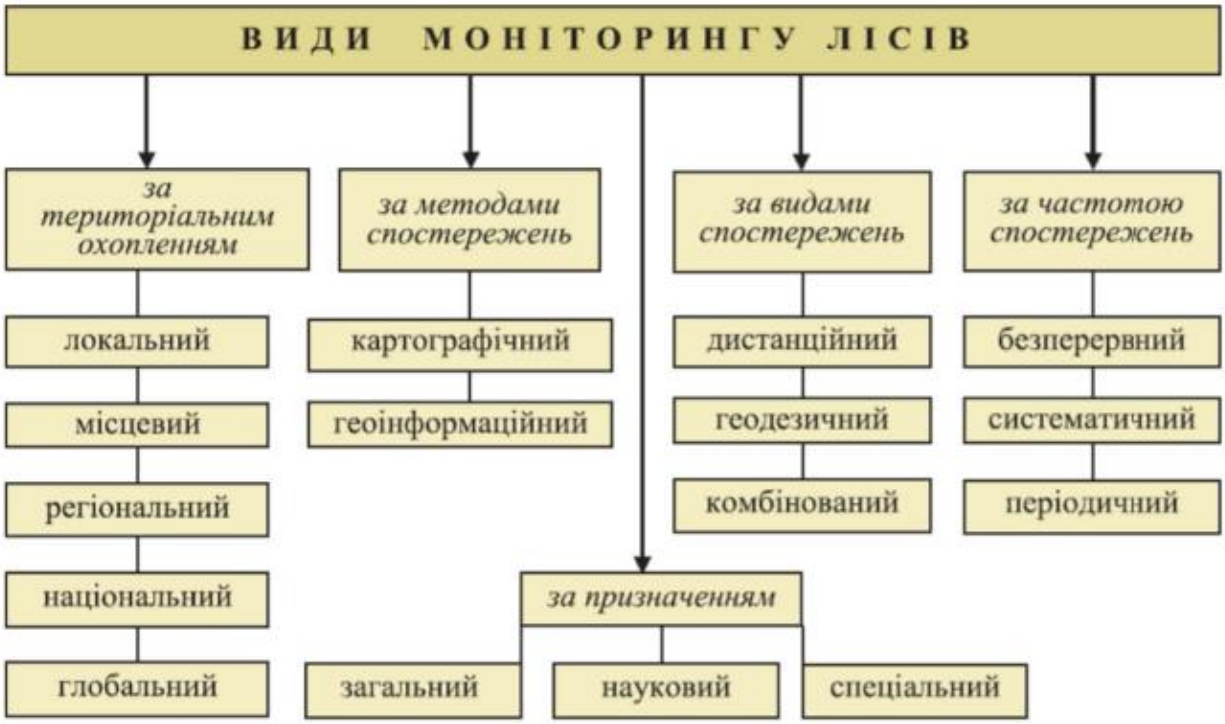


Рисунок 1.1 - Класифікація видів моніторингу лісів

Дистанційні спостереження з космічних та повітряних апаратів можуть проводитися через оптичні та радіодіапазони, а також за допомогою візуальних спостережень. Зокрема, аеровізуальні методи широко використовуються для патрулювання лісів та виявлення лісових пожеж, а також для моніторингу їхньої динаміки. Щоб забезпечити ефективність моніторингу, необхідно мати комплекс даних дистанційного зондування, які відрізняються за просторовою роздільною здатністю, спектральними характеристиками каналів, швидкістю та регулярністю зйомок та швидкістю постачання інформації споживачам.

Рекомендують чотири основних категорії просторового розрізнення інформації, отриманої через дистанційне зондування для застосування у моніторингу лісів:

- оглядова космічна інформація оптичного діапазону з низьким просторовим розрізненням (близько 1 000 м), отримувана зі штучних супутників Землі NOAA (радіометр AVHRR), т.ін., а також в радіодіапазоні пасивними засобами знімання (СВЧ-радіометрами) до 10 км;
- космічні зображення середнього радіуса (100-200 м), отримані із супутників MODIS та ін.;
- космічні зображення оптичного і радіодіапазонів з великим (10-20 (30) м) - ШСЗ типу SPOT, Landsat-7, та ін.;
- космічні або аерозображення оптичного і радіо діапазонів надвисокого радіуса (1-5 м) - ШСЗ типу Ikonos, КВР, аерознімків.

У космічних системах дистанційного зондування використовуються різні діапазони електромагнітного випромінювання для отримання даних. Серед них ультрафіолетовий, видимий, інфрачервоний, мікрохвильовий і радіодіапазони. Кожен з цих діапазонів має свої особливості та дозволяє отримувати різні типи інформації про об'єкти на Землі, включаючи ліси.

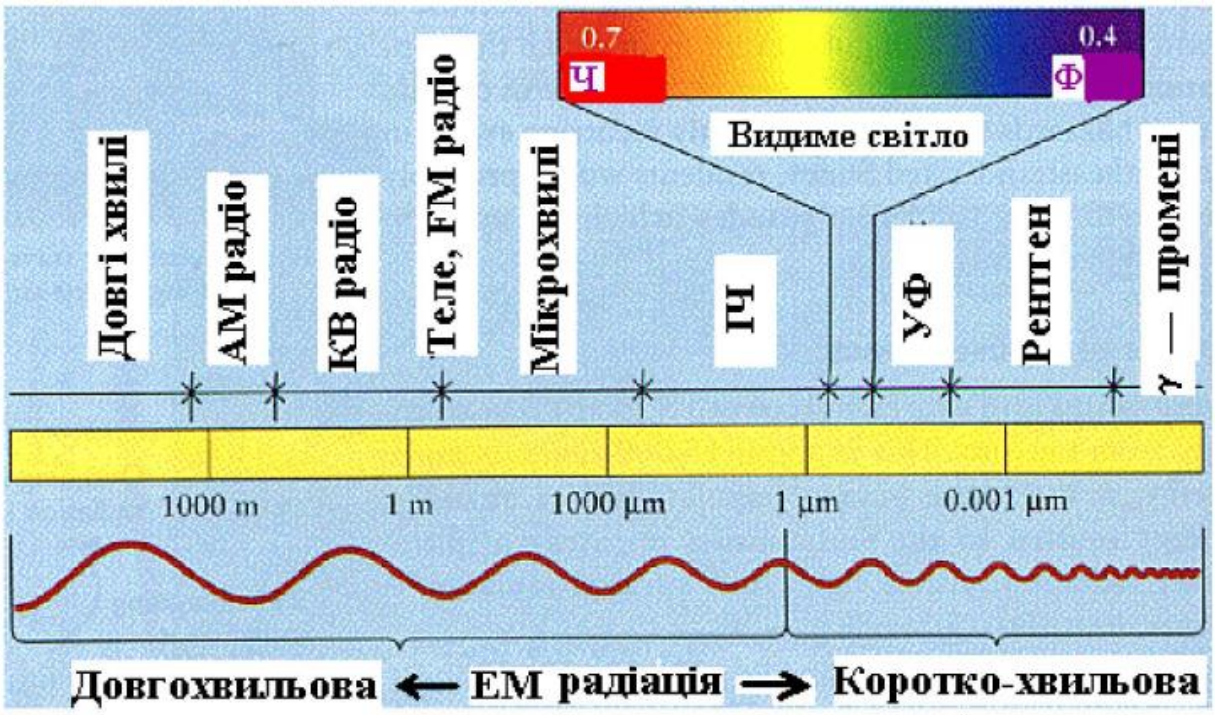


Рисунок 1.2 - Діапазон електромагнітного випромінювання

Ультрафіолетовий діапазон (0,1-0,38 мкм) дозволяє оцінювати стан рослин і водойм, а також визначати поширення газових домішок та озону. Видимий (0,38-0,74 мкм) та інфрачервоний (0,74-2,50 мкм) діапазони використовуються для знімання лісових масивів у різних режимах, дозволяючи отримати інформацію про спектральні характеристики об'єктів на землі. Наприклад, хлорофіл у листі поглинає певні ділянки спектру, що може бути використано для аналізу стану рослинності. Різниця у відбитті променів у різних діапазонах спектру дає змогу отримати цінну інформацію про стан лісів, що корисно для їх вивчення та картографування.

Тепловий діапазон спектру (від 2,5 мікрометрів до 1 мм) надає важливу інформацію про теплове випромінювання з поверхні землі. Цей діапазон використовується для вивчення теплових властивостей ландшафту та отримання інформації про температурний режим лісів. Відмінності у температурі можуть бути виявлені в різних типах рослинності, на різних вікових ділянках лісу та на різних типах ґрунту. Такі дані дозволяють виявляти зони різних температур, що корисно для вивчення умов місць зростання рослин. Також теплові зйомки можуть допомогти виявляти хворі, ушкоджені або сухі дерева, оскільки вони можуть мати відмінні температурні характеристики порівняно зі здоровими деревами. Цей метод також ефективний для виявлення лісових пожеж та контролю ситуації вночі чи в умовах обмеженої видимості через дим. Космічні зйомки в тепловому діапазоні дозволяють здійснювати моніторинг великих територій, виявляти приховані вогнища пожеж та вести спостереження вдень і вночі.

Мікрохвильовий і СВЧ (від 1 міліметра до 1 метра) діапазони електромагнітного випромінювання дозволяють отримувати інформацію про топографічні особливості місцевості, вологість у ґрунті та рослинах, а також виявляти впливи промислових викидів на рослини. Радіодіапазон (більше 10 міліметрів) забезпечує специфічну інформацію про рельєф та покрив стелі лісу.

Використання радарного знімання дозволяє детально аналізувати місцевий рельєф, що є важливим для процесів лісового господарства. Також цей метод дозволяє класифікувати ділянки лісу за висотою та щільністю деревостану, виявляти різноманітні лісові площі, такі як рідколісся, ділянки після пожеж, або вирубки різних типів. Радіолокаційне знімання може бути проведене у будь-яку погоду і в будь-який час доби, що робить його важливим і універсальним інструментом для вивчення територій та діагностики лісів.

Особливості застосування певних методів і систем ДЗЗ при вирішенні конкретних завдань лісового моніторингу наведені у таблиці 1.1 [2].

Таблиця 1.1 – Методологія застосування супутникових ДЗЗ-систем для вирішення задач моніторингу лісів

Задачі моніторингу Супутникові системи що застосовуються	Типи систем дистанційних методів, що використовуються, та види знімань	Супутникові системи що застосовуються
Моніторинг пожежної небезпеки в лісах	Системи низького просторового розрізнення, метеорологічні космічні апарати	NOAA/TERRA/MODIS (США)
Виявлення вогнищ загоряння, оцінювання площ та динаміки лісових пожеж	Оперативне знімання в тепловому діапазоні (доповнюється зніманням у видимому)	TERRA ASTER, EO-1, TERRA/MODIS, Aqua/MODIS (США), SPOT (Франція)
Виявлення згарищ, наслідків інших стихійних лих	Знімання районів, постраждалих від стихійних лих (знімки у видимому, БІЧ, СВЧ, радіодіапазонах)	ALOS (Японія), RapidEye (Німеччина), SPOT (Франція), Radarsat-2 (Канада), EO-1 (США)
Контроль за лісокористуванням, у т. ч. за вирубками. Виявлення незаконних рубок	Періодичне знімання високої і надвисокої роздільної здатності, радарне знімання	ALOS (Японія), RapidEye (Німеччина), SPOT (Франція), IRS P6/Resourcesat (Індія), Radarsat-2 (Канада), EROS (Ізраїль), IKONOS(США)

Ландшафтний моніторинг, ландшафтне картографування, моніторинг заповідних територій	Знімання середнього високого і надвисокого розрізнення в мультиспектральному режимі	ALOS (Японія), RapidEye (Німеччина), IRS 1C/1D (Індія), IRS P6/Resourcesat (Індія), Landsat-7 (США)
Лісовпорядкування, оновлення карт, інвентаризація лісів, кадастр земель лісового фонду	Знімання високого і надвисокого розрізнення, доповнюване наземними роботами, аерозніманням	IKONOS, WorldView-2, GeoEye, QuickBird (США), SPOT(Франція)
Обчислення площ лісів, виявлення динаміки лісистості, оновлення топографічних карт	Використання тимчасових рядів знімків високого і надвисокого розрізнення	ALOS (Японія), IKONOS, QuickBird (США), SPOT (Франція)
Вивчення вуглецевого балансу, підрахунок біомаси в лісах для кліматологічних досліджень	Системи дистанційних методів середнього розрізнення (видимий, БІЧ, СВЧ-діапазони), системи дистанційних методів для вивчення атмосфери і погоди	Landsat-7 (США),IRS 1C/1D (Індія), TRMM (Швеція), Envisat (Євросоюз), EO-1 (США)

Порівняльний аналіз космічних знімків різних типів показує, що:

1. Знімки високої роздільної здатності ідеально підходять для визначення таксаційних показників лісових масивів. Спеціалісти можуть використовувати як традиційні методи, так і нові методи візуального аналізу для інтерпретації цих зображень. Найбільш популярні знімки з апаратів такої якості — це знімки від WorldView-1, WorldView-2, GeoEye-1, GeoEye-2 та QuickBird.
2. Знімки високої роздільної здатності є ключовим джерелом інформації про всі аспекти лісового картографування. Вони допомагають у проведенні інвентаризації лісів, контролю за їх використанням та виявленні раптових змін у лісовому фонді.

3. Знімки середньої роздільної здатності, завдяки мультиспектральній інформації, дійсно дозволяють виявляти як природні, так і антропогенні зміни в лісових масивах. Ці зображення також корисні для контролю за лісогосподарською діяльністю та виявлення різких змін у лісах. Вони відзначаються низькою вартістю та великим масштабом покриття території, що робить їх ефективним інструментом для багатьох застосувань у лісовому господарстві.
4. Радіолокаційні дані мають деякі переваги, зокрема, високу роздільну здатність, що робить їх корисними для отримання інформації про лісові покриття, зміни в лісовому середовищі та лісокористуванні. Особливо вони корисні для зон з постійною хмарністю, оскільки можуть здійснювати знімання в будь-яку погоду. Такі дані також можуть бути корисними для отримання зображень навіть в зимовий період, коли інші методи можуть бути обмежені.

Сучасні методи дистанційного зондування дійсно надають можливість отримувати значну кількість інформації про лісові ресурси та створювати системи моніторингу на різних рівнях просторової роздільної здатності. Однак, наразі оцінка лісових ресурсів залишається певною мірою залежною від системи статистичних показників, яка використовується для прийняття управлінських рішень у лісовому господарстві та охороні лісу.

Комбінування даних, отриманих з різних джерел, таких як супутникові знімки, мультиспектральні дані, радарні зображення та інші дистанційні дані, може допомогти створити більш повну та об'єктивну картину стану лісових ресурсів. Такий підхід може вдосконалити традиційні методи оцінки і готувати більш деталізовані та точні дані для управлінських рішень у лісовому секторі.

Зміни в доступності космічних знімків є також важливими, якщо наприклад у 1985 році використання такої інформації було практично недосяжним через високі ціни, що робило її використання непосильною для

українських науковців та дослідників. Однак, зараз доступ до знімків середньої роздільної здатності з певних супутників, таких як супутник "Sentinel", є безкоштовним для наукових досліджень.

Якщо дослідження вимагає довготривалої ретроспективної перспективи, вчені часто використовують базу даних, отриманих завдяки американській програмі Landsat [4]. Ця програма відзначається широким набором даних, що охоплюють тривалий час і дозволяють вивчати зміни в ландшафтах та середовищах з високою деталізацією.

1.4 Висновки

Розробка більш ефективних методів для отримання інформації про лісові масиви в Україні — важливе завдання, особливо в умовах соціально-економічних змін.

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз структури лісового фонду природного заповідника "Древлянський", проведено дослідження предметної сфери моніторингу лісів, а текож досліджено ефективність застосування супутникових знімків для оцінки просторової структури лісових ресурсів цього заповідника.

Використання супутникових знімків для аналізу території може допомогти у підвищенні ефективності управління ресурсами та вирішенні природоохоронних завдань. Такий підхід дозволяє отримувати важливу інформацію про ліси та їх структуру без прямого втручання в екосистему, що є важливим для їх збереження та ефективного використання.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ

2.1 Методи аналізу земного покриву

2.1.1 Дистанційне зондування землі

Дистанційне зондування визначається як мистецтво і наука отримання інформації про об'єкт без безпосереднього фізичного контакту з [5]. Це наукова технологія, яка може бути використана для вимірювання і моніторингу важливих біофізичних характеристик і людської діяльності на Землі. Світ вступив в епоху електронної інформації, яка зараз більше, ніж будь-коли раніше, включає в себе просторову інформацію. Люди, відповідальні за управління природними ресурсами Землі і планування майбутнього розвитку, визнають важливість точної просторової інформації, що міститься в цифровій ГІС. Багато з найважливіших шарів біофізичної, землекористування/земного покриву та соціально-економічної інформації в базі даних ГІС є результатом аналізу даних дистанційного зондування [5,6].

Інтерпретація зображень визначається як вивчення зображень з метою ідентифікації об'єктів і оцінки їх значущості [5]. Різночасовий аналіз властивостей поверхні необхідний для моніторингу різних змін, що відбуваються на поверхні Землі. Дані дистанційного зондування, зібрані різними приладами, становлять унікальну базу даних, що забезпечує систематичне локальне, регіональне і глобальне покриття для різних просторових розрізнень. Дослідження різночасових наборів даних дистанційного зондування часто обмежується спрощеними схемами аналізу змін.

Дослідження різночасових наборів даних дистанційного зондування часто обмежується спрощеними схемами аналізу змін. Більш потужні процедури пропонуються методами аналізу змін, які вимагають кількісних або напівкількісних вхідних даних [6]. Багато дослідників повідомляють про застосування даних дистанційного зондування для візуалізації змін у

земному покриві і, зокрема, лісовому покриві з плином часу [7]. Аналіз тенденцій може бути використаний для розрахунку численних параметрів, які можуть бути отримані з часових рядів супутникових даних. Поєднання різних параметрів дозволяє отримати додаткову інформацію, яку нелегко зрозуміти за допомогою інших схем обробки.

Рослинність є одним з найважливіших компонентів екосистем. Знання про варіації у розподілі видів рослин та угруповань, зміни у фенологічних (ростових) циклах рослинності, а також зміни у фізіології та морфології рослин дають цінну інформацію про кліматичні, екологічні, геологічні та фізико-географічні характеристики місцевості [8]. Вчені присвятили значну кількість зусиль розробці датчиків і алгоритмів візуальної та цифрової обробки зображень для вилучення важливої біофізичної інформації про рослинність з даних дистанційного зондування [9].

Потенційна роль дистанційного зондування як інформаційного ресурсу для підтримки сталого лісокористування видається величезною і негайною, що ґрунтується головним чином на двох фактах:

- стале лісокористування вимагає синоптичних і повторюваних біофізичних і біохімічних даних про рослинність для великих географічних територій протягом тривалих періодів часу;

- дистанційне зондування є єдиним способом отримання таких даних.

2.1.1.1 Тематичне картографування на основі оптичного супутника Sentinel-2

Sentinel-2 - це друге покоління супутників, яке було запущено у рамках програми Copernicus Європейського космічного агентства. Перший супутник (Sentinel-2A) було запущено 23 червня 2015 року, а другий (Sentinel-2B) - 7 березня 2017 року. Супутники Sentinel-2 оснащені мультиспектральними датчиками (табл . 2.1), які мають кілька переваг порівняно з попередніми супутниками, зокрема [10]:

– Sentinel-2 забезпечує просторову роздільну здатність від 10 метрів до 60 метрів, в залежності від діапазону;

– у Sentinel-2 є 13 оптичних каналів спостереження, що охоплюють віддалені та ближні інфрачервоні спектральні діапазони;

– для кращого спостереження різних аспектів земної поверхні, Sentinel-2 має більше каналів спостереження.

Ці супутники використовуються для моніторингу земельного використання, контроль водних ресурсів, лісового покриву, сільськогосподарського виробництва та інших галузей. Дані, зібрані Sentinel-2, допомагають в дослідженні та моніторингу земної поверхні та навколишнього середовища.

Таблиця 2.1 – Характеристики спектральних діапазонів Sentinel-2[10]

Канал	Довжина хвиль (мкм)	Застосування Sentinel-2
1	0,443 - 0,515 (синій)	Розрізнення ґрунту/рослинності; Батиметрія/прибережна картографія; Ідентифікація культурних/міських об'єктів
2	0,496 - 0,577 (зелений)	Картографування зеленої рослинності (вимірює пік відбиття); Ідентифікація культурних/міських об'єктів
3	0,635 - 0,685 (червоний)	Рослинна та нерослинна рослинність і види рослинна дискримінація (поглинання рослинами хлорофілу); Ідентифікація культурних/міських

		особливостей
4	0.650 - 0.680 мкм (Ближній інфрачервоний) -	Ідентифікація типів рослин/рослинності, стану здоров'я та вміст біомаси; Розмежування водних об'єктів; Вологість ґрунту
5	.697 - 0.713 мкм (Короткий хвильовий інфрачервоний)	Чутливий до вологості ґрунту та рослинності; Розрізнення снігу та хмарність
6	0.740 - 0.760 мкм (Короткий хвильовий інфрачервоний)	Стрес рослинності та дискримінація вологості ґрунту, пов'язана з тепловим випромінюванням; Теплове картування (міське, водне)
7	0.773 - 0.793 мкм (Короткий хвильовий інфрачервоний)	Розрізнення типів мінералів і гірських порід; Чутливий до вологості рослинності
8	0.784 - 0.904 мкм (Ближній інфрачервоний)	імірювання води у водних об'єктах; Аналіз океанічних явищ; Оцінка якості води
8A	0.855 - 0.875 мкм (Ближній інфрачервоний)	Оцінка концентрації хлорофілу в воді та рослинності
9	0.940 - 0.960 мкм (Короткий хвильовий інфрачервоний) -	Оцінка кількості аерозолів в атмосфері; Моніторинг газів в атмосфері
10	1.360 - 1.390 мкм (Тепловий інфрачервоний)	Вимірювання температури поверхні ґрунту та води

11	1.560 - 1.660 мкм (Тепловий інфрачервоний)	Вимірювання температури поверхні ґрунту та води
12	2.100 - 2.300 мкм (Тепловий інфрачервоний)	Вимірювання температури поверхні ґрунту та води

2.1.2 Методи аналізу земельного покриву на основі супутникових знімків

Згідно з FAO (Продовольча та сільськогосподарська організація ООН) [12]: "Земний покрив - це спостережувана (біо)фізична оболонка земної поверхні". FAO визначає землекористування як заходи, діяльність та ресурси, які люди здійснюють на певному типі земного покриву. Згідно з цими визначеннями, земельний покрив відповідає фізичному стану поверхні землі, наприклад, ліс, сільськогосподарські угіддя, пасовища, міста, тоді як землекористування відображає діяльність людини, наприклад, використання землі як промислових зон, житлових районів та сільськогосподарських полів.

Наведені вище визначення встановлюють прямий зв'язок між земним покривом і діями людей у навколишньому середовищі, тобто землекористування може призводити до змін земного покриву. Як правило, земний покрив не збігається з землекористуванням. Клас землекористування складається з декількох типів земного покриву. Дані дистанційного зондування можуть надавати інформацію про земний покрив, а не про землекористування.

Зміну земного покриву можна розділити на дві форми (FAO) [11]:

- перетворення з однієї категорії земного покриву в іншу, наприклад, з лісу на луки;

- модифікація в межах однієї категорії, наприклад, від густого лісу до відкритого лісу.

Земний покрив є фундаментальною змінною, яка впливає і пов'язує багато частин людського і фізичного середовища. Зміни ґрунтового покриву можна легко виявити за допомогою супутникових знімків на основі змін

спектрального відбиття або введення просторових об'єктів, таких як рослинність, дороги чи контури полів. Природні та антропогенні порушення, екологічна спадковість та відновлення після попередніх порушень - все це сили, які змінюють екосистемні структури та процеси в ландшафті, спричиняючи зміни в ґрунтовому покриві. Знання цих змін та їхніх рушійних сил може дати уявлення про регіональну динаміку ландшафтів. Зміни земного покриву можна аналізувати або візуально, або за допомогою цифрового аналізу. Загалом, двох дат знімків достатньо для документування набору змін у земному покриві, які відбулися між двома датами отримання знімків.

Універсальної системи класифікації землекористування/земного покриву не існує. Натомість, було розроблено декілька систем, які відповідають потребам різних користувачів. Як правило, системи мають ієрархічну структуру з можливістю об'єднання класів нижчого рівня в наступний найвищий рівень і з послідовною деталізацією для всіх класів на певному рівні ієрархії. При виборі системи класифікації для використання з даними дистанційного зондування, класи повинні мати поверхневий вираз в електромагнітному спектрі. Наприклад, такі культури, як ананаси, відбивають електромагнітне випромінювання, але банківський банкомат збоку будівлі нелегко виявити на супутниковому знімку, особливо за допомогою більшості датчиків, що спрямовані донизу.

Згідно з Дженсеном (Jensen, 1996), класифікація цифрових зображень - це процес розподілу пікселів на класи. Зазвичай, кожен піксель розглядається як окрема одиниця, що складається зі значень у декількох спектральних діапазонах. Порівнюючи пікселі між собою та з пікселями відомої ідентичності, можна зібрати групи подібних пікселів у класи, які відповідають інформаційним категоріям, що цікавлять користувачів даних дистанційного зондування. Останнім часом для класифікації зображень широко застосовують багато передових підходів до класифікації, таких як штучні нейронні мережі, нечіткі множини та експертні системи [6]. Cihlar

обговорив стан і дослідницькі пріоритети картографування рослинного покриву для великих територій. Автори [8] оцінили підходи до класифікації земного покриву за даними дистанційного зондування з середньою просторовою роздільною здатністю. Загалом, підходи до класифікації зображень можна згрупувати як контрольовані та неконтрольовані, піксельні та об'єктно-орієнтовані, жорсткі та м'які, залежно від того, чи використовуються навчальні вибірки, чи ні, просторова одиниця аналізу, а також від того, чи використовуються параметри, чи ні.

Попіксельні процедури зазвичай виконують класифікацію, використовуючи спектральну логіку прийняття рішень, яка застосовується до кожного пікселя зображення окремо та ізольовано. На відміну від них, об'єктно-орієнтовані класифікатори використовують як спектральні, так і просторові шаблони для класифікації зображень. Це двоетапна процедура, що включає сегментацію зображення на дискретні об'єкти, за якою слідує, класифікацію цих об'єктів. Основне припущення полягає в тому, що зображення, яке класифікується, складається з відносно однорідних "ділянок", які мають більший розмір, ніж окремі пікселі. Цей підхід схожий на візуальну інтерпретацію цифрових зображень людиною, яка працює в декількох масштабах одночасно і використовує колір, форму, розмір, текстуру, візерунок і контекстну інформацію для групування пікселів у значущі об'єкти.

Масштаб об'єктів є однією з ключових змінних, що впливають на крок сегментації зображення в цьому процесі. Наприклад, у випадку лісового ландшафту, на дрібному масштабі об'єкти, що класифікуються, можуть являти собою окремі крони дерев. Сегментація в проміжному масштабі створить об'єкти, що відповідають деревостанам дерев схожих порід і розмірів, тоді як у ще більш грубому масштабі великі ділянки лісу будуть об'єднані в один об'єкт. Очевидно, що фактичний параметр масштабу, який використовується для об'єктно-орієнтованої класифікації, буде залежати від

ряду факторів, включаючи роздільну здатність сенсора і загальний масштаб об'єктів на ландшафті, які аналітик намагається ідентифікувати.

Після сегментації зображення існує багато характеристик, які можна використовувати для класифікації об'єктів. Ці характеристики діляться на дві групи. Один набір характеристик притаманний кожному об'єкту - його спектральні властивості, текстура, форма тощо. Інші характеристики описують взаємозв'язок між об'єктами, включаючи їхню зв'язність, близькість до об'єктів того ж або іншого типу тощо.

Об'єктно-орієнтований аналіз також може бути використаний для сприяння змінам земного покриву, оскільки цей підхід здатен зберігати зв'язки "батько-дитина" між об'єктами. Наприклад, велике сільськогосподарське поле, що містить лише один тип сільськогосподарських культур у ранній період часу, може бути класифіковане як один об'єкт. Якщо пізніше на полі з'являться кілька типів культур, батьківське поле буде розділене на численні дочірні об'єкти. Доведено, що цей підхід дає кращі результати класифікації, ніж класифікація на основі пікселів, особливо для даних з високою просторовою роздільною здатністю. Метод eCognition наразі є найпоширенішою об'єктно-орієнтованою класифікацією [12].

2.2 Методи моніторингу та аналізу змін у земельному покриві

Аналіз даних дистанційного зондування для отримання значущої біофізичної інформації про рослинність за окрему дату часто є цінним. Однак, щоб оцінити динаміку екосистеми, необхідно спостерігати за рослинністю в часі і визначити, які зміни в ній відбуваються. Для такого типу досліджень часто корисними є супутникові дані з відносно середньою та високою часовою роздільною здатністю.

Дослідники, які займаються виявленням змін за допомогою супутникових знімків, розробили широкий спектр методик для виявлення змін у навколишньому середовищі. Процедури виявлення змін можна

згрупувати за трьома широкими категоріями, що характеризуються процедурами перетворення даних і методами аналізу, які використовуються для визначення зон значних змін:

– покращення зображень;
– класифікація різночасових даних;
– порівняння двох незалежних класифікацій земного покриву.

Підхід до покращення зображень передбачає математичне поєднання знімків різних дат, наприклад, віднімання смуг, нормування, регресію зображень або аналіз головних компонент (PCA). До покращеного зображення застосовуються порогові значення, щоб ізолювати пікселі, які змінилися. Класифікація базується на однократному аналізі комбінованого набору даних з двох або більше різних дат з метою виявлення областей змін. Порівняння після класифікації - це порівняльний аналіз зображень, отриманих у різні моменти після попередньої незалежної класифікації.

Методи виявлення змін за допомогою дистанційного зондування передбачають використання різночасових наборів супутникових даних для розрізнення ділянок зміни земного покриву між датами зйомки. Це може надати актуальну просторово-часову інформацію про стан лісових ресурсів, яка допоможе у прийнятті рішень щодо відповідного втручання (формулювання політики, планування та управління). Виявлення змін може застосовуватися для різних цілей, таких як аналіз змін рослинного покриву, моніторинг змінного обробітку землі, оцінка вирубки і деградації лісів, вивчення змін у фенології рослинності, сезонних змін у пасовищному господарстві, оцінка збитків, виявлення стресів у сільськогосподарських культурах, моніторинг стихійних лих, змін у навколишньому середовищі тощо. Основний принцип виявлення змін за допомогою дистанційного зондування полягає в тому, що зміни в рослинному покриві призводять до змін у значеннях радіації. Аналізуючи спектральні відмінності в сигнатурах об'єкта (зміни рослинного покриву), можна виявити зміни в ґрунтовому

покриві. Таким чином, виявлення змін за допомогою дистанційного зондування відіграє ключову роль у покращенні інформації про просторові та часові зміни, спричинені природною та антропогенною діяльністю, з точки зору часової та економічної ефективності.

Застосування напівавтоматизованих та об'єктно-орієнтованих підходів до даних супутникового дистанційного зондування було предметом багатьох нещодавніх досліджень. Існує великий інтерес до виявлення змін за допомогою мультиспектральних знімків з високою просторовою роздільною здатністю. Деякі дослідники працюють над виявленням змін за допомогою зображень з високою просторовою роздільною здатністю із застосуванням об'єктно-орієнтованих методів сегментації зображень. Наприклад, Walter здійснив об'єктно-орієнтоване виявлення змін, використовуючи вже існуючі об'єкти розміщених у базі даних ГІС. Його метод виявлення змін базувався на класифікації максимальної правдоподібності (MLC) і використовував вхідні навчальні дані, витягнуті з бази даних ГІС.

Значна частина сучасних робіт зосереджена на застосуванні об'єктно-орієнтованого аналізу до часових досліджень. Наприклад, Im та ін. порівнюють різні методи виявлення змін на основі пікселів та об'єктів і роблять висновок, що вдосконалені об'єктні підходи є кращими. Виявлення змін на основі об'єктів було застосовано до різних екологічних проблем, включаючи зростання міст та заростання земель чагарниками.

2.3 Літературний огляд популярних методів моніторингу стану лісового покриву

Багато досліджень зосереджуються на порівняльному аналізі методів вилучення, класифікації та кількісної оцінки рослинності, включаючи ліси, а деякі поєднують це із зображеннями часових рядів.

Хуан та ін. [13] перевірив алгоритми опорних векторних точок (SVM), класифікації максимальної правдоподібності (MLC), нейронної мережі (ANN) і дерева рішень (DT) на модифікованому зображенні Landsat TM

(1985) зі східного Меріленда, США, з шістьма поверхнями. класи (замкнуті ліси, відкриті ліси, ліси, нелісові землі, земельно-водна суміш і вода). Вони оцінили продуктивність класифікаторів на основі тематичної точності та виділили результати SVM залежно від типу використовуваного ядра. Шафрі та ін. [14] протестували MLC, Spectral Angle Mapper (SAM), ANN і DT для картографування тропічних лісів Малайзії з використанням гіперспектральних даних і підкреслили чудову продуктивність MLC в умовах максимальної біотичної гетерогенності. Отукей і Блашке [15] використовували DT, SVM і MLC для оцінки змін земного покриву за допомогою двох сцен Landsat (5 TM з 1986 року та 7 ETM+ з 2001 року) у східній Уганді та виявили, що всі методи були ефективними з прийнятною точністю, з невеликою перевагою для DT.

Порівняльні дослідження в цій галузі включають вивчення поведінки різних комбінацій вхідних даних, що використовуються в класифікаціях, поведінки класифікаторів із змінним розміром навчальної вибірки та ефективності комбінацій між методами класифікації. Наприклад, Forkuor et al. [16] використовували SVM, Random Forest (RF) і Stochastic Gradient Boosting (SGB) для тестування різних комбінацій зображень Landsat 8 OLI і Sentinel-2 для картографування землекористування та ґрунтового покриву в Буркіна-Фасо. Вони виявили, що використання двох смуг Red Edge від Sentinel-2 покращило картографування земельного покриву (LULC), а SGB перевершує SVM і RF за загальною продуктивністю. Тхань Ной і Каппас [17] порівнювали RF, k-найближчий сусід (kNN) і SVM для шести типів земельного покриву землекористування (LULC), включаючи ліси, використовуючи 14 різних розмірів навчальних вибірок у дельті Червоної річки у В’єтнамі на основі зображення Sentinel-2. Їхнє дослідження підкреслило необхідність коригування параметрів для порівнюваних класифікаторів і показало меншу чутливість SVM до розмірів навчальної вибірки. Adugna та ін. [18] протестували SVM і RF для регіонального картографування земельного покриву в Східній Африці на основі сцен FY-3C

з роздільною здатністю 1 км. Нгуєн та ін. [19] використовував 446 зображень Sentinel-2 з 2017 і 2018 років для картографування LULC, включаючи класи тропічних лісів, у Дак Нонг, В'єтнам, використовуючи чотири методи класифікації (мультиноміальна логістична регресія — MLR, покращений kNN, RF і SVM), перевірені для чотирьох часових послідовностей. (вологий сезон, сухий сезон, весь 2017 рік і комбінація вологого та сухого сезонів). Руджері та ін. [20] поєднано лінійне спектральне розмішування (LSU) з об'єктним аналізом зображень (OBIA) та технікою ітеративного самоорганізуючого аналізу даних (ISODATA) з OBIA для картографування земельного покриву у високогірних районах Колумбії, використовуючи схему класифікації, адаптовану з CORINE Land Cover (CLC), що включає класи лісів. Дабіджа та ін. [21] використовував Random Forests і SVM на супутникових зображеннях Sentinel-2 і Landsat 8 OLI, що охоплюють три регіони з трьох країн Європейського Союзу, щоб перевірити класи CLC, включаючи класи лісів, такі як широколистяні та хвойні ліси.

Усі представлені дослідження спрямовані на визначення методів класифікації з найвищою ефективністю для заданих вхідних даних і цілей. Наше дослідження має на меті оцінити динаміку лісового покриву в гірській місцевості площею 6535 га, розташованій на північному заході Румунії, протягом 17-річного періоду (2003–2019) за допомогою методів ГІС, а також методів вилучення та класифікації лісової рослинності на мультиспектральних сценах. Зокрема, ми використовували LSU у поєднанні з природними перервами (NB), методом Оцу (OM) і SVM, SAM, SVM, RF і MLC відповідно.

2.4 Висновки

У другому розділі ми провели короткий огляд концепції дистанційного зондування в контексті сталого лісокористування. Розглянуто супутник Sentinel-2 та його датчики, які використовуються при моніторингу лісового

господарства, відзначивши їхню важливість для моніторингу та управління лісовими ресурсами.

Проведено широкий огляд системи класифікації рослинного покриву, підкресливши важливість точної інтерпретації цифрових зображень та методів виявлення змін. Розглянули методи класифікації цифрових зображень, об'єктно-орієнтований аналіз та сегментацію, які допомагають точно ідентифікувати та класифікувати лісовий покрив.

Окрім цього, було проведено літературний огляд популярних методів дослідження лісового покриву, що надає нам важливий контекст для подальших розділів нашої роботи. Дослідження в галузі лісового господарства та моніторингу лісових ресурсів є критичним завданням у збереженні та сталому використанні цього важливого природного ресурсу.

3 РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ПРИРОДНОГО ЗАПОВІДНИКА "ДРЕВЛЯНСЬКИЙ"

3.1 Методика моніторингу стану лісового покриву

Методика моніторингу стану лісового покриву представлено на рисунку 3.1. Робочий процес за цією схемою складається з наступних етапів:

- отримати доступ до різночасових супутникових знімків з Sentinel-2;
- розрахувати індекси рослинності (NDVI, RVI, GRVI);
- виконати контрольовану класифікацію для отримання міської рослинності (алгоритм максимальної правдоподібності у цьому дослідженні використовувався алгоритм максимальної правдоподібності)
- виконати неконтрольовану класифікацію індексів рослинності з використанням комплексного методу K-means та головних компонентів (PCA);
- виявити порушення деревостанів;
- виявити зміни у неконтрольованій класифікації на основі аналізу головних компонент та побудувати карти змін по роками;
- побудувати карту змін лісового покриву з 2016 року по 2023 рік.

Розглянемо детально кожний етап.

Перший етап нашої дослідницької роботи включає в себе підготовку та завантаження різночасових супутникових знімків з Sentinel-2. Цей етап є важливим в контексті аналізу змін у земному покриві, оскільки він забезпечує нашу основну джерельну інформацію для подальших досліджень.

Спершу ми визначаємо необхідні дати та регіони для дослідження (в нашій роботі це заповідник «Древлянський»), враховуючи наші наукові цілі та об'єктиви. Потім ми звертаємось до ресурсів, які надають доступ до архіву супутникових зображень Sentinel-2, таких як космічна агенція ESA (Європейське космічне агентство) або інші платформи.

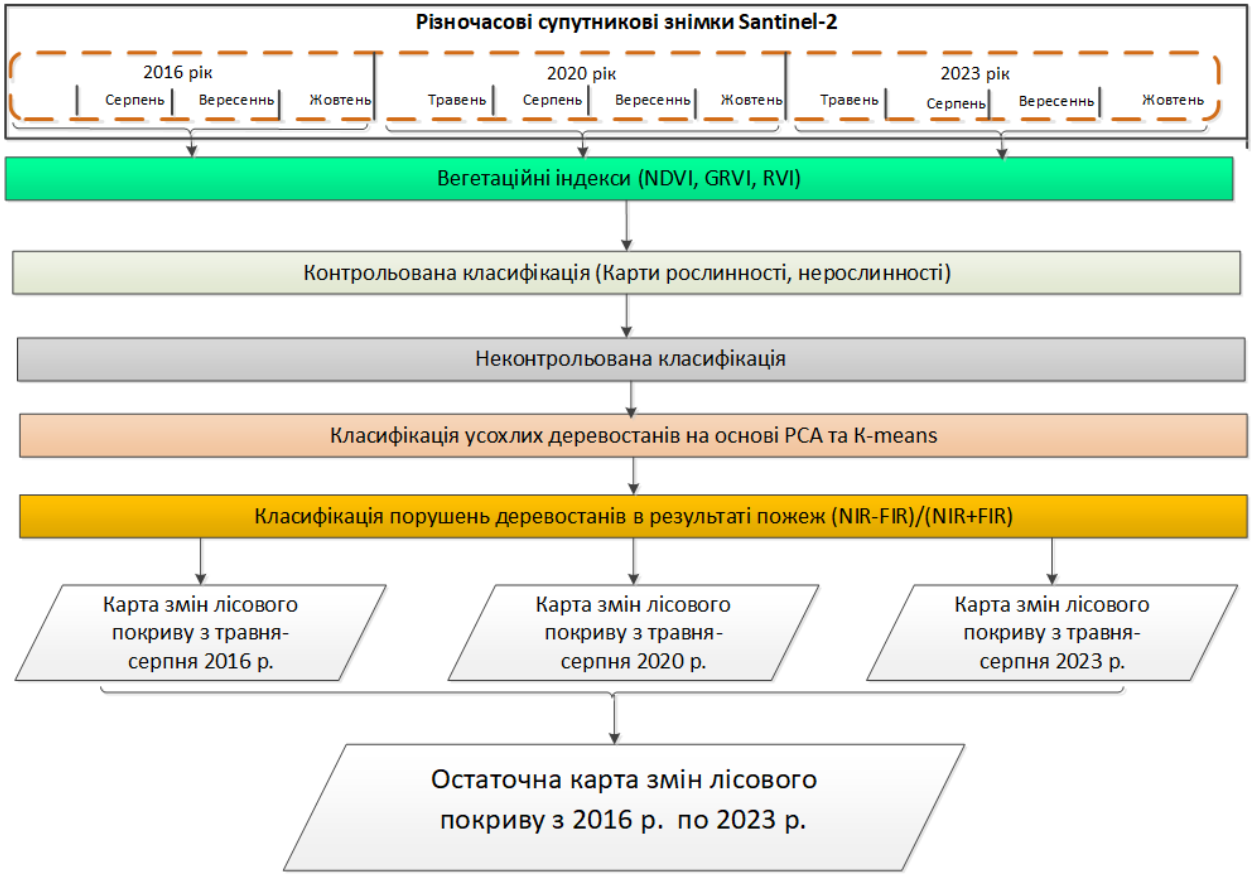


Рисунок 3.1 – Схема методики

Після цього ми виконуємо пошук і вибір конкретних зображень з урахуванням потрібних дат та регіонів. Завантажені зображення зберігаються для подальшого аналізу та обробки, де вони стануть основою для дослідження змін у земному покриві на наступних етапах дослідження.

Наступним етапом є розрахунок індексів рослинності. Індекси рослинності - це математичні комбінації різних спектральних смуг електромагнітного спектра, і вони є більш чутливими, ніж окремі смуги до параметрів рослинності [14]. Вони є мірами активності рослинності і призначені для пошуку функціонального зв'язку між характеристиками рослинності та даними дистанційного даними дистанційного зондування [16,2]. Основне призначення індексів рослинності полягає в тому, щоб посилити інформацію що міститься в даних спектрального відбиття, шляхом вилучення мінливості, зумовленої характеристиками рослинності, і мінімізації впливу ґрунту та атмосфери [7]. Таким чином, корисні

"супутникові показники, які допомагають у визначенні стану рослинності, можуть бути вилучені зі знімків Sentinel-2 (як у цьому дослідженні). Індекси рослинності вимірюють активність рослинності і показують сезонні та просторові зміни зеленого листя.

Основною метою індексів рослинності є покращення та вилучення інформації, що міститься в даних дистанційного зондування спектрального відбиття, шляхом вилучення мінливості, пов'язаної з характеристиками рослинності [71]. Тому, вони підходять для виявлення просторової мінливості в межах поля [70].

У цьому дослідженні в процесі моніторингу стану лісового покриву було використано три вегетаційні індекси: NDVI, RVI та GRVI. NDVI є найпоширенішим вегетаційним індексом і являє собою співвідношення NIR та червоної смуги (табл. 3.1). Так як поглинання хлорофілом цих двох смуг електромагнітного спектру є найвищим [8]. NDVI було розраховано з використанням (Sentinel-2) червоного (канал B4) та ближнього інфрачервоного (канал B8) діапазонів. Поширеною практикою в дистанційному зондуванні є використання співвідношень між діапазонами для усунення різних ефектів альбедо. Якщо використовується RVI [16] (табл.3.1), ізолінія рослинності сходиться в початку координат. Він розраховується з використанням (Sentinel-2) червоного (канал B4) та ближнього інфрачервоного (канал B8) діапазонів. GRVI [19] (табл. 3.1) є чутливим до швидкості фотосинтезу в лісових пологах, оскільки на зелену та червону відбивну здатність сильно впливають зміни пігментів листя. Він був розрахований з використанням зеленого (канал B3) та ближнього інфрачервоного (канал B8) каналів (Sentinel-2).

Таблиця 3.1 – Формули індексів рослинності

Індекс рослинності	**Загальна формула**	**Формула для супутника Sentinel-2**
NDVI	$NDVI = \left(\frac{R_{NIR}-R_{red}}{R_{NIR}+R_{red}}\right)$	$NDVI = \left(\frac{B_8-B_4}{B_8+B_4}\right)$

RVI	$RVI = \frac{R_{NIR}}{R_{red}}$	$RVI = \frac{B_8}{B_4}$
GRVI	$GRVI = \frac{R_{NIR}}{R_{green}}$	$GRVI = \frac{B_8}{B_3}$

Наступним етапом було проведено контрольовану класифікацію. Класифікація рослинного покриву проводилась на основі знімків Sentinel-2 за квітень, липень, серпень та вересень 2016 – 2023 років з використанням алгоритму максимальної правдоподібності та з плагіном напівавтоматичної класифікації. Алгоритм максимальної правдоподібності [7] обчислює розподіли ймовірностей для класів, пов'язані з теоремою Байєса, оцінюючи приналежність пікселя до того чи іншого класу земного покриву. Зокрема, розподіли ймовірностей для класів набувають вигляду багатовимірних нормальних моделей. Математично це можна описати як:

– функція правдоподібності (Likelihood Function, L):

$$L(C|X) = P(X|C) = P(X1|C) * P(X2|C) * ... * P(Xn|C), \quad (3.1)$$

де $L(C|X)$ - функція правдоподібності, яка визначає ймовірність того, що певна сцена (C) відповідає спостереженням (X); $P(X|C)$ - умовна ймовірність, що задані спостереження (X) відповідають сцені (C); $P(X1|C), P(X2|C), ..., P(Xn|C)$ - ймовірності для окремих спостережень (пікселів) при умові, що сцена відповідає класу (C);

– апріорна інформація (Prior Information, π), $\pi(C)$ - апріорна інформація про ймовірність вибору класу (C). Це може бути базова інформація про розподіл класів на певній території;

– апостеріорна ймовірність (Posterior Probability, P):

$$P(C|X) = (L(C|X) * \pi(C)) / \Sigma(L(Ci|X) * \pi(Ci)) \quad (3.2)$$

де $P(C|X)$ - апостеріорна ймовірність того, що сцена відповідає класу (C) при заданих спостереженнях (X); $\Sigma(L(Ci|X) * \pi(Ci))$ - сума правдоподібностей для всіх можливих класів.

Алгоритм максимальної правдоподібності обчислює апостеріорну ймовірність для кожного класу на підставі спостережень та апріорної інформації, і вибирає клас з найвищою апостеріорною ймовірністю для кожного пікселя на супутниковому зображенні.

Після цього було виконано неконтрольовану класифікацію. Неконтрольована класифікація [17] намагається знайти кластери в n-вимірному просторі ознак і відносить ці кластери до групи. Зразки не потрібні, і це простий спосіб сегментації та розуміння зображення. У даному випадку було побудовано представлення розподілу значень вегетаційних індексів для періоду з 2016 по 2023 роки на основі K-means unsupervised класифікації [18]. K-середні без нагляду обчислюють початкові середні значення класів, рівномірно розподілені в просторі даних (ознак), а потім ітеративно кластеризують пікселі в найближчий клас за допомогою методу мінімальної відстані. Цей алгоритм спрямований на мінімізацію квадрата функції помилки [78], і його можна виразити рівнянням (3.3) [78]:

$$J = \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} \left\| x_i^{(j)} - c_j \right\|^2 , \tag{3.3}$$

де $\|x_i^{(j)} - c_j\|^2$ - обрана міра відстані між точкою даних xi(j) та центром кластера c_j; $x_i^{(j)}$ - точка даних, c_j – центр кластера; n – точки даних, k – номер класу.

Метою K-середніх є зменшення варіабельності в межах кластера (класу). Таким чином, можна відокремити і краще представити ділянки з подібними значеннями індексів рослинності (шляхом градації значень індексів), а також отримати краще уявлення про розподіл (просторову складову) індексів. Неконтрольовані класифікації індексів рослинності були проведені з метою градації їхніх значень і розрізнення різних умов рослинності при оцінці стану міських лісів і рослинності.

Наступним кроком є виявлення змін на основі аналізу головних компонент (PCA). Метод PCA широко використовується протягом багатьох років для визначення основних розмірів супутникових знімків [14],

виявлення змін рослинного покриву [13] або різночасових супутникових даних. Завдяки своїй простоті та здатності покращувати інформацію про зміни, він став одним з найпопулярніших методів виявлення змін. PCA використовується, коли передбачається, що різночасові дані сильно пов'язані між собою і що інформація про зміни може бути виділена в нові компоненти. Порівняно з проектуванням даних на вихідні координати, що дозволяє виявити зміни у кореляції даних, які неможливо виявити у вихідних індивідуальних змінних. Крім того, це може гарантувати, що будь-які зміни у вихідних змінних будуть відображені в проекціях. Вхідними даними для PCA були результати неконтрольованої класифікації трьох індексів рослинності (GRVI, NDVI, RVI) за травень, липень, серпень і вересень 2016 – 2023 роки. Основна ідея використання методу PCA полягала у визначенні набору ортогональних головних компонент з вихідного простору ознак, які б краще представляли дані в новому просторі. Іншими словами, були виділені зміни в різних станах лісових територій. Це забезпечило основну передумову для виявлення змін в області інтересу: наявність зображень з двох або більше різних дат.

Наступним кроком в аналізі лісового покриву після застосування алгоритму максимальної правдоподібності є класифікація порушень деревостанів, зокрема, виявлення зон, які були пошкоджені пожежами. Для цього ми використовуємо вираз:

$$Пожежі=(NIR-FIR)/(NIR+FIR), \quad (3.4)$$

де NIR представляє поблизу інфрачервоне випромінювання (Near-Infrared), а FIR - інфрачервоне випромінювання (Far-Infrared).

Вираз (3.4) використовується для обчислення індексу, який допомагає виявити зони пожеж та пошкодження деревостану на супутникових зображеннях. Загальна ідея полягає в тому, що пожежі часто призводять до високих температур та теплового випромінювання, що виявляється на інфрачервоних зображеннях (FIR). Одночасно, листя та рослинна біомаса мають властивість відбивати багато інфрачервоного світла (NIR).

Таким чином, вираз (3.4) обчислює різницю між інфрачервоним та далекого інфрачервоного випромінюванням та нормалізує її до загальної інтенсивності світла. В результаті цього обчислення можна виявити території, де інфрачервоне світло переважає, що може свідчити про пошкодження деревостану через пожежу.

Завершальним етапом є побудова карт лісового покриву по рокам та остаточний аналіз змін у відповідному форматі, на картах з використанням плагіну в ГІС. На цьому етапі було обрано метод максимальної правдоподібності - це статистичний підхід, який використовує інформацію про спектральні характеристики класів для визначення класифікації кожного пікселя на зображенні. Він базується на припущенні, що спектральні характеристики кожного класу розподілені за певним законом, і використовується для призначення кожному пікселю класу, який найбільше ймовірно відповідає його спектральному сигналу.

Математично описати MLC можна наступним чином:

Нехай:

X - множина спектральних характеристик (вектор спектральних сигналів) для одного пікселя на супутниковому зображенні.

C - множина можливих класів, які можуть бути призначені пікселю.

$P(C_i)$ - ймовірність того, що піксель належить до класу

$p(X/C_i)$ – ймовірність спостереження спектральних характеристик X для пікселя, який фактично належить до класу C_i. Ця ймовірність може бути оцінена з тренувальних даних для кожного класу.

Мета методу максимальної правдоподібності - знайти той клас C_i, для якого спостережені спектральні характеристики X найбільше ймовірні на пікселі:

$$C_{ML} = \arg max_i P(C_i|X) = \arg max_i \frac{P(X|C_i)P(C_i)}{P(X)}, \qquad (3.5)$$

C_{ML} – клас, призначений пікселю методом максимальної правдоподібності, $P(C_i|X)$ – умовна ймовірність того, що піксель належить

до класу *Ci* при заданих спектральних характеристиках *X*, $P(X|C_i)$ - ймовірність спостереження *X* при умові, що піксель належить до класу *Ci*, $P(C_i)$ – апріорна ймовірність класу *Ci*, *P(X)* – зfгальна ймовірність спостереження *X*.

Завдяки методу максимальної правдоподібності, піксель призначається класу, для якого умовна ймовірність спостереження *X* є найвищою, враховуючи статистичну інформацію про класи та апріорну ймовірність класу.

3.2 Програмне забезпечення комп'ютерної технології

Для реалізації запропонованої методики в п.3.1 буде використано QGIS. Перший етап включає завантаження супутникових знімків (Sentinel-2). Для цього використано вбудований інструмент завантаження растрів. Завантажили знімки заповіднику «Древлянський» та виконали первинну обробку даних (рис.3.2).

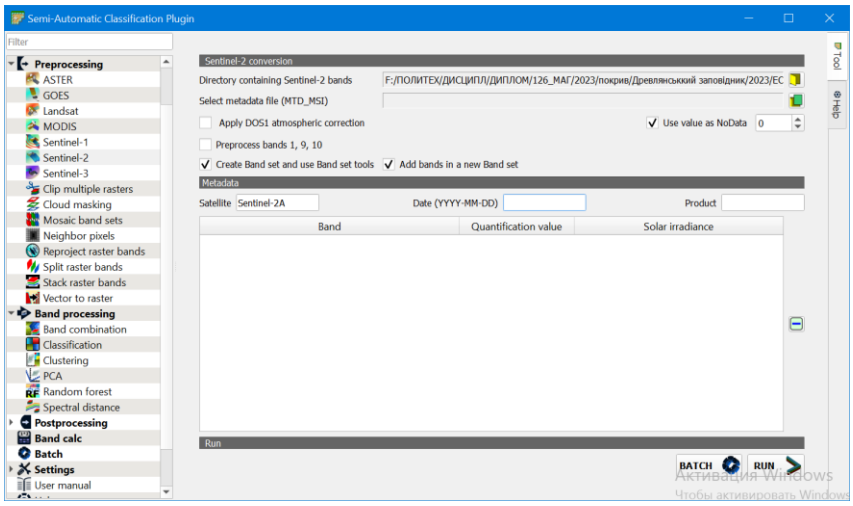
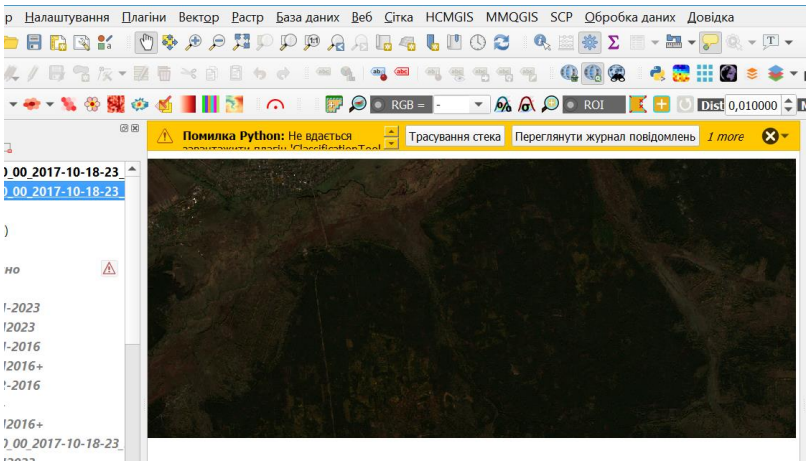
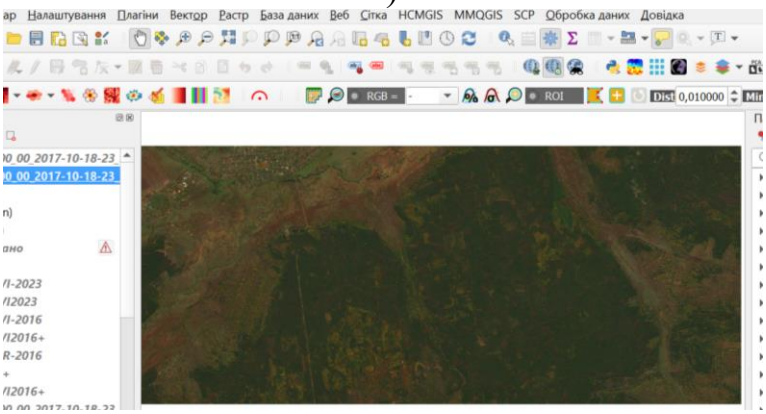


Рисунок 3.2 – Попередня обробка

Результат після попередньої обробки наведено на рис.3.3.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Результат оброки зображення: а) первинне; б) після обробки

Після завантаження знімків розраховуються вегетаційні індекси, такі як NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GRVI (Green-Red Vegetation Index), RVI (Ratio Vegetation Index). Ці індекси використовуються для визначення стану рослинності на зображеннях. На цьому етапі використовуємо калькулятор растрів. На рисунку 3.4 наведено фрагмент розрахунку індексу RVI. Аналогічно було виконано розрахунки для NDVI, GRVI за формулами табл.3.1

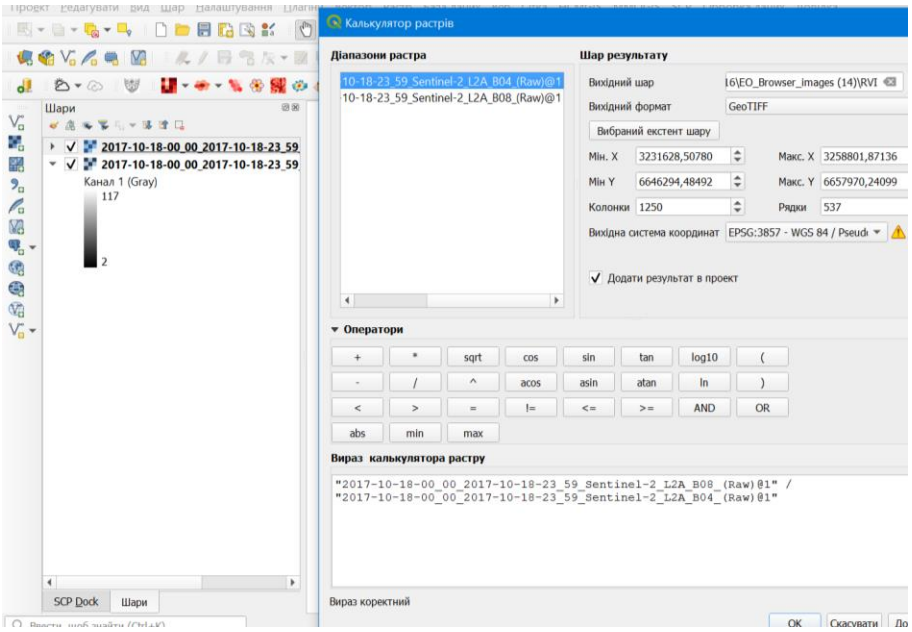


Рисунок 3.4 – Розрахунок індексу RVI

Для контрольованої класифікації визначаються класи рослинності та нерослинності на зображеннях. Вибираються зразки для навчання класифікаційних моделей. Важливо вибрати зразки, які репрезентативно відображають кожен клас і включають різноманітні спектральні характеристики (різні типи рослин, ґрунти, нерослинні покриви тощо). На рис.3.5 наведена класифікація покриву. Як можна побачити з рисунку 3.5 створено таблицю, яка містить інформацію про зразки для навчання. У цій таблиці є інформація про спектральні характеристики (NDVI, GRVI, RVI) та класифікаційних міток (клас рослинності або нерослинності).

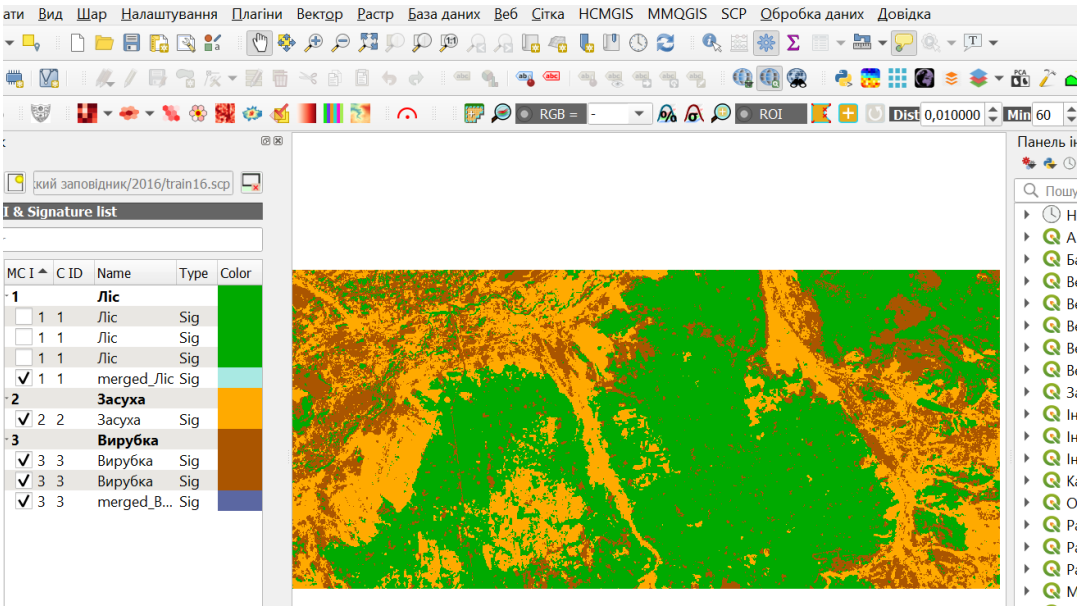


Рисунок 3.5 - Контрольованої класифікації

Класифікацію усохлих деревостанів виконано на основі методів PCA та K-means. Таке рішення дозволяє виділити усохлі деревостани або інші рослинні класи, які можуть бути виявлені за допомогою спектральних змін на зображенні. Для реалізації використано інструментарії геоінформаційної системи (рис.3.6).

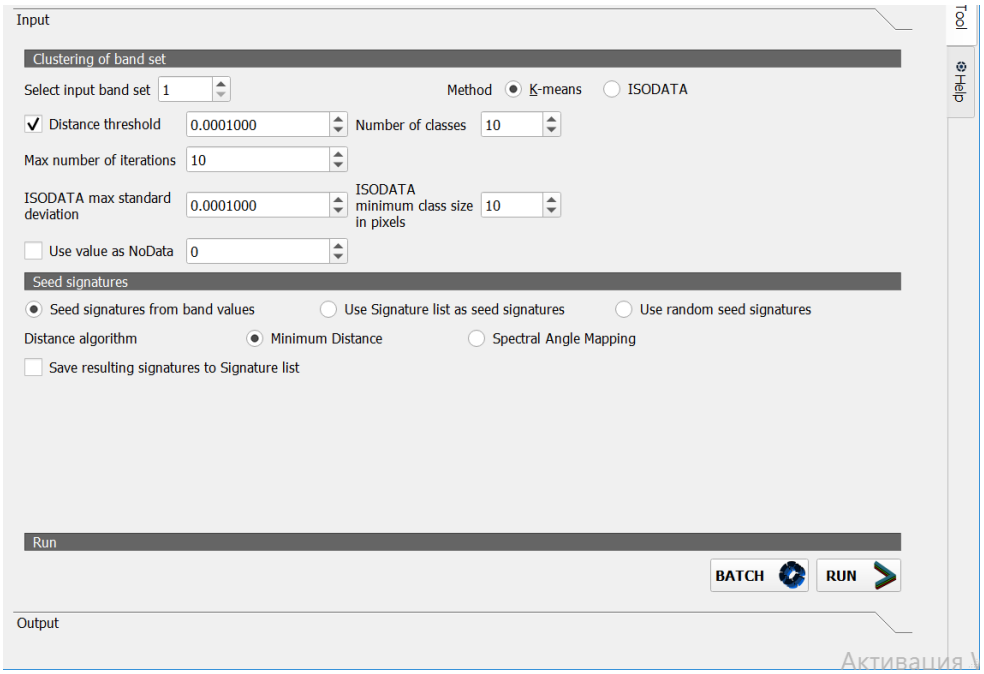


Рисунок 3.6 – Реалізація методів PCA та K-means

Після цього використовуємо знову калькулятор растрів для розрахунку індексу пожежі (рис.3.7) для виявлення порушень деревостанів після пожежі на зображенні. Пікселі, для яких цей індекс перевищує певний поріг, класифікуються як порушення.

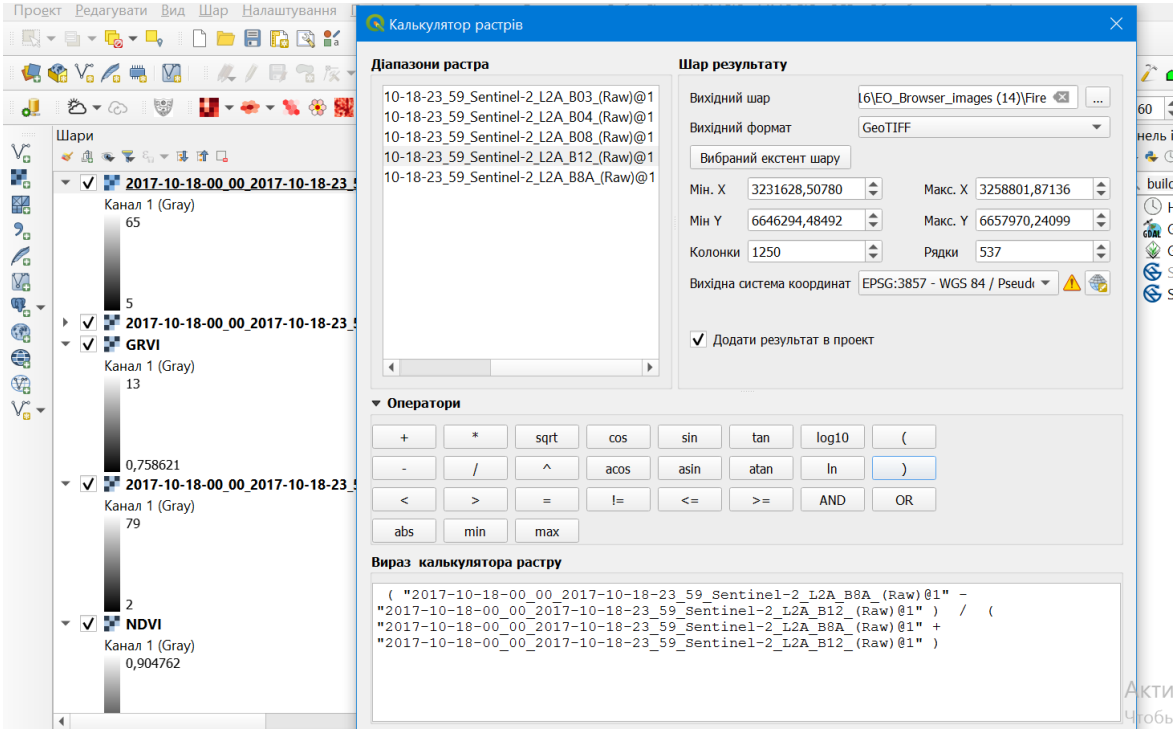


Рисунок 3.7 – Розрахунок індексу пожежі

Після класифікації візуалізуємо результати, аналізуємо кожний клас та розподіл рослинності та не рослинності на зображенні. Для цього використовуємо метод максимальної правдоподібності, модель буде навчена на основі спектральних характеристик класів об'єктів та регіонів навчання після попередніх етапів. Завантажуємо зображення в різні роки та періоди і застосовуємо метод максимальної правдоподібності.

3.3 Виявлення та аналіз змін лісового покриву заповідника “Древлянський”

Для дослідження лісового покриву заповідника “Древлянський” було використано знімки Sentinel-2, які представлено на рис.3.8.

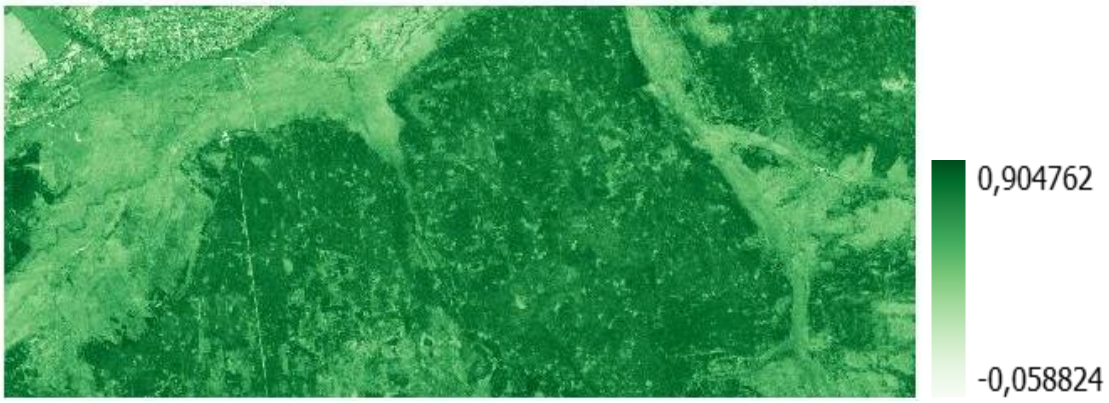
а)

б)

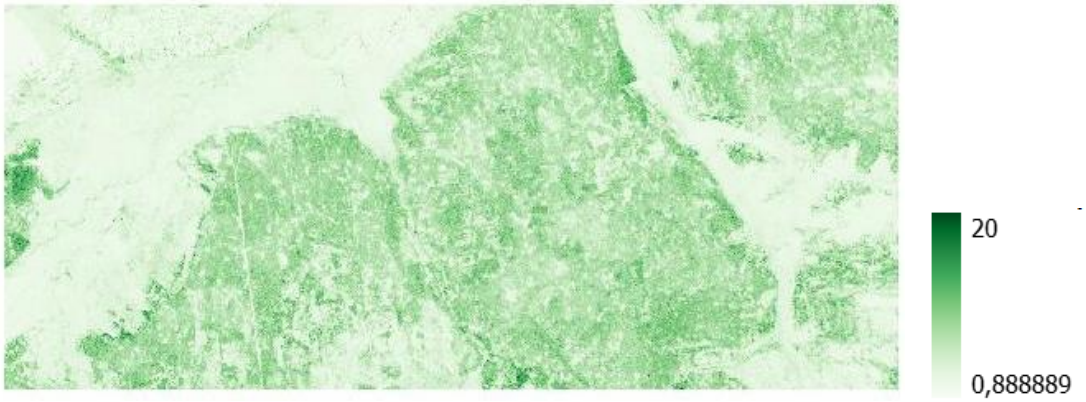
Рисунок 3.8 – Супутникові знімки після обробки: а) 2016 рік; б) 2023 рік

На рисунку 3.9 наведено результати індексів рослинності за 2016 рік, а в додатку А наведено індекси за 2023 рік.

а)



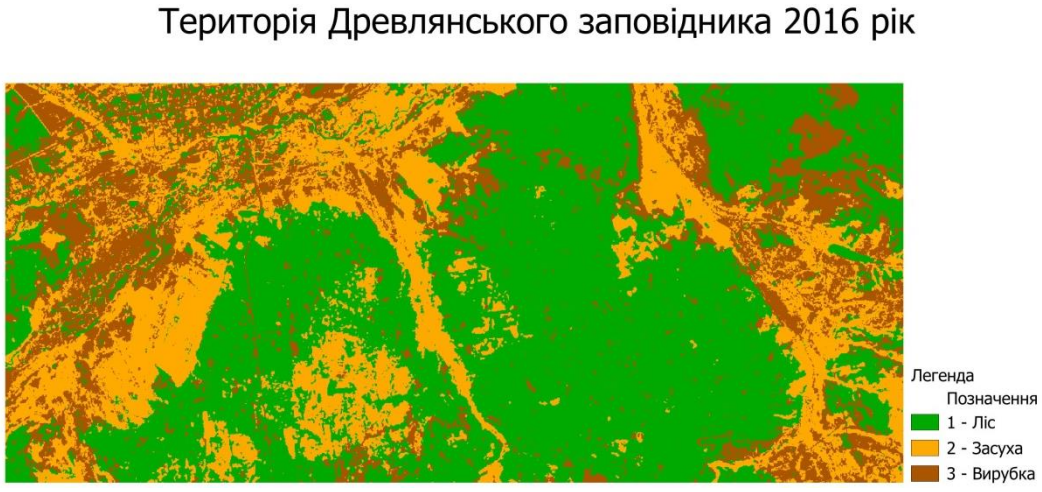
б)



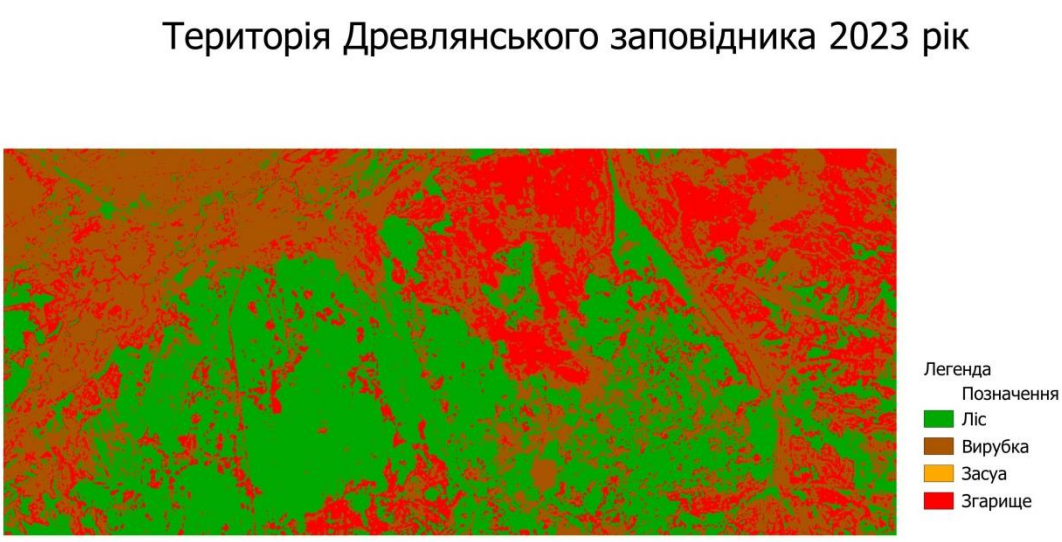
в)

Рисунок 3.9 – Результати розрахунків індексів рослинності: а) GRVI; б) NDVI; в) RVI

Результати класифікації лісового покриву наведено на рисунку 3.10.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Результати класифікації покриву рослинності: а) за 2016 рік; б)за 2023 рік

Після того як застосували комплексне поєднання PCA та K-means отримали xml файл з числовими даними за кожний рік для кожного види індексу рослинності. Дані були оброблені мовою програмування високого рівня та побудовано графік значень (рис.3.10). Лістинг наведено в додатку Б.

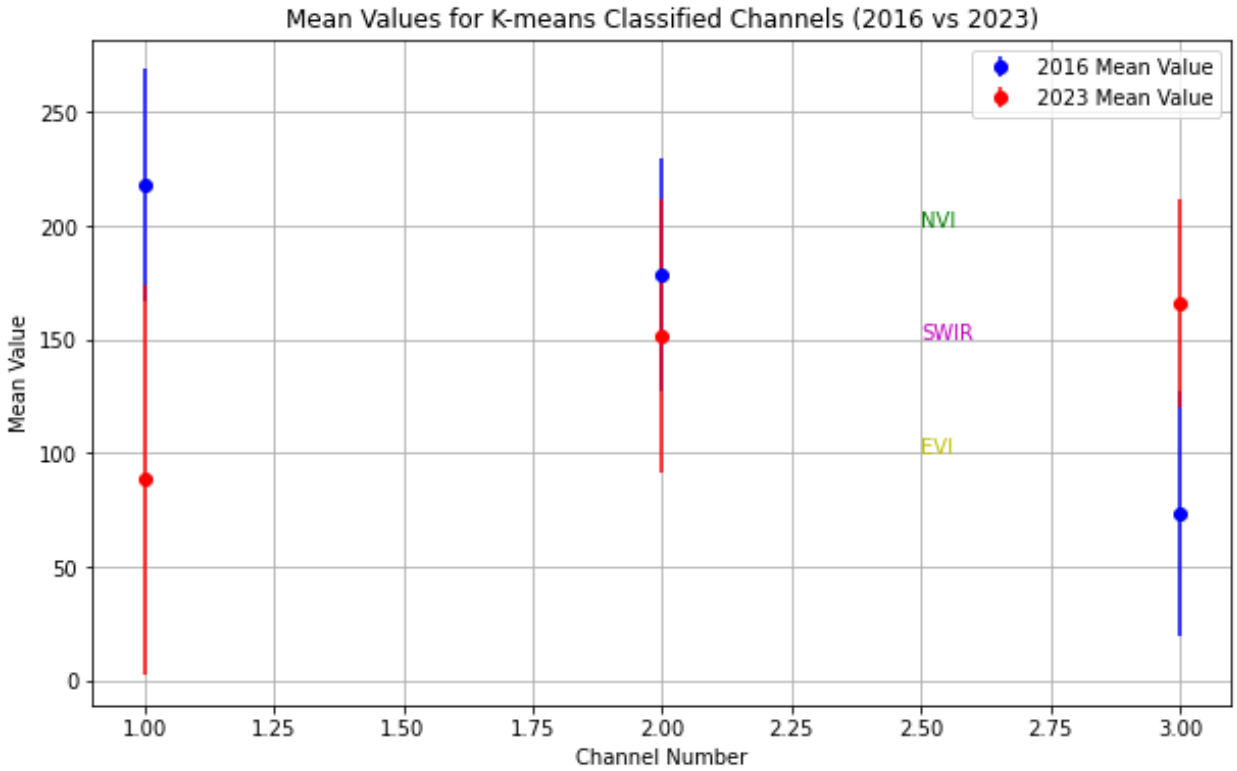


Рисунок 3.10 – Графік залежності метода K-means за 2016 та 2023 роки

Після застосування методу максимальної правдоподібності отримано зміни лісового покриву на рис.3.11 та числові значення в табл. 3.2. На рисунку 3.11 градієнт синього вказує на зміни лісового покриву протягом семи років, зелений – змін в цій частині не відбулось.

Таблиця 3.2 – Значення пікселів зміни лісового покриву

V_ReferenceClass	1.0	2.0	3.0	Total
1.0	77267723	44999577	0	122267300"
2.0	44269798	38809216	40044263	123123278"
3.0	39824479	3429583	28624922	71878985"
Total	161362000	87238377	68669186	317269564"

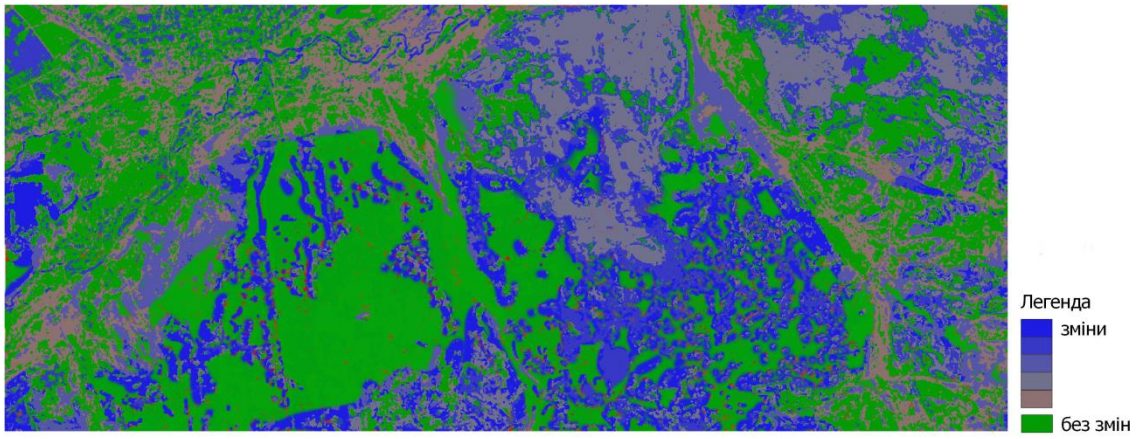


Рисунок 3.11 – Зміни лісового покриву заповідника “Древлянський”

Аналізуючи отримані результати з рис.3.11, можна побачити суттєві зміни лісового покриву на що вказує синій колір. Так як, 12.04.2020 р. на території заповідника були пожежі, це спостерігається на супутниках даного періоду. На рисунку 3.12 можна спостерігати за вигорілими ділянками після пожежі.

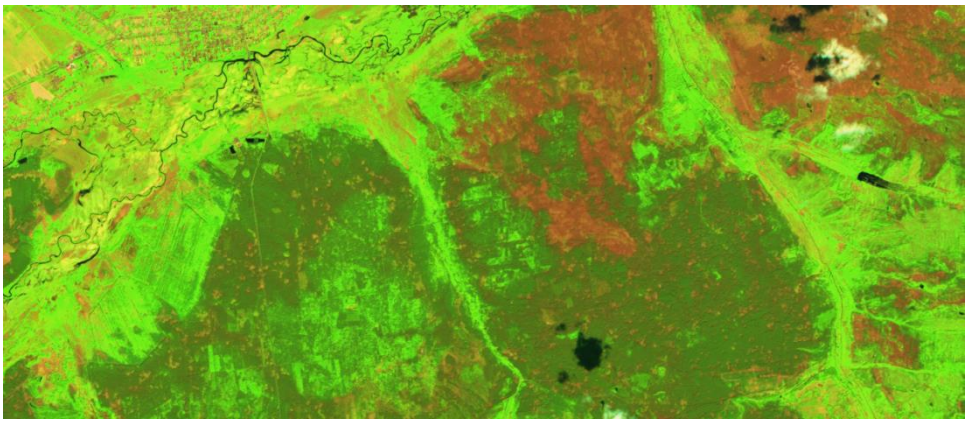


Рисунок 3.12 – Вигоріли ділянки лісового покриву

Зміни в структурі і стані лісового покриву у заповіднику за 7 років були результатом впливу різних факторів. Зокрема:

– лісові пожежі;

– усихання дерев, спостерігалося надмірне усихання дерев, впливаючи на стан лісового екосистеми. Передчасне усихання та втрата листя спричинили зміни у візуальному вигляді лісового покриву та його структурі;

– санітарні рубки, додатковим фактором, що вплинув на структуру лісового покриву, були санітарні рубки. Ці заходи були призначені для видалення хворих або відмерлих дерев з метою запобігання поширенню хвороб та паразитів, це можна побачити сіро-бузковим кольором на рис.3.11.

Результатом цих факторів була істотна зміна у структурі та стані лісового покриву в заповіднику в період з 2016 по 2023 роки. Пожежі, усихання дерев та санітарні рубки разом створили нові умови для розвитку лісової екосистеми та потребують уваги для подальшого відновлення та догляду за цим природним резерватом.

3.4 Висновки

В розділі було описано докладну методику моніторингу стану лісового покриву, включаючи використання різних типів супутникових знімків, обчислення різних індексів (таких як NDVI, GRVI, RVI), а також класифікацію рослинності та інших структур.

За допомогою розробленої комп'ютерної технології було виявлено та здійснено аналіз змін у лісовому покриві заповідника. Це дозволило виявити та визначити природні та антропогенні фактори, які впливають на цю екосистему.

Результати моніторингу та аналізу стану лісового покриву мають велике значення для оцінки стану природної екосистеми, виявлення впливу різних факторів (наприклад, пожежі, усихання дерев, санітарні рубки) та прийняття заходів для збереження і відновлення лісів у заповіднику "Древлянський".

В розділі було показано, що використання сучасних технологій та програмного забезпечення, таких як QGIS та алгоритми аналізу даних, дозволяє здійснювати більш точний та ефективний моніторинг лісового покриву та виявлення змін.

ВИСНОВКИ

Була проведена робота з використанням сучасних комп'ютерних технологій та супутникових знімків Sentinel-2 для моніторингу стану лісового покриву природного заповідника "Древлянський".

В рамках роботи була розроблена і описана методика моніторингу стану лісового покриву, яка включає в себе аналіз різних видів супутникових знімків, обчислення вегетаційних індексів та класифікацію рослинності та інших структур. За допомогою програмного забезпечення та комп'ютерної технології були виявлені та аналізовані зміни у лісовому покриві заповідника. Це дозволило визначити вплив різних факторів, таких як лісові пожежі, усихання дерев та санітарні рубки, на цю природну екосистему.

Результати дослідження підкреслюють важливість постійного моніторингу та аналізу стану лісового покриву у природних заповідниках. Вони надають інформацію для прийняття рішень щодо збереження та відновлення лісів, а також для вжиття необхідних заходів на догляд і контроль за цим природним резерватом. Так було виявлено вплив таких факторів як пожежі, усихання дерев, санітарні рубки на лісовий покрив заповідника "Древлянський".

Робота демонструє, як сучасні комп'ютерні технології та програмне забезпечення, таке як QGIS та алгоритми аналізу даних, можуть бути використані для збільшення точності та ефективності моніторингу та аналізу лісового покриву.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ареф’єва, С.І. Розробка ГІС-сервера лісогосподарської галузі України /С.І. Ареф’єва, О.В. Барладін, О.Ю. Скляр // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Сер. География. – Т. 24. – 2011. – № 3. – С. 24-32.

2. Методика і перспективи створення автоматизованих технологій обробки матеріалів дистанційного зондування в цілях рішення задач природокористування [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: http://ukr-referats.blogspot.com/2013/04/blog-post_12.html.

3. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В.І. Лялько та М.О. Попова. - К.: Наукова думка, 2006. - 360 с. 2. Бунтова О.Г.

4. Барладін О. Використання даних дистанційного зондування Землі для створення актуальних електронних ресурсів / О. Барладін, Л. Миколенко // Сучас. досягнення геодез. науки та вир-ва. - 2011. - Вип. 1. - С. 162-167. - Бібліогр.: 15 назв. - укр.[1].

5. Shimizu, K.; Ota, T.; Mizoue, N. Detecting Forest Changes Using Dense Landsat 8 and Sentinel-1 Time Series Data in Tropical Seasonal Forests. Remote Sens. 2019, 11, 1899.

6. Bouvet, A.; Mermoz, S.; Ballère, M.; Koleck, T.; Le Toan, T. Use of the SAR Shadowing Effect for Deforestation Detection with Sentinel-1 Time Series. Remote Sens. 2018, 10, 1250.

7. Ruetschi, M.; Small, D.; Waser, L.T. Rapid Detection of Windthrows Using Sentinel-1 C-Band SAR Data. Remote Sens. 2019, 11, 115

8. Bullock, E.L.; Woodcock, C.E.; Olofsson, P. Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis. Remote Sens. Environ. 2018, 238.

9. Reiche, J.; Verhoeven, R.; Verbesselt, J.; Hamunyela, E.; Wielaard, N.; Herold, M. Characterizing Tropical Forest Cover Loss Using Dense Sentinel-1 Data and Active Fire Alerts. Remote Sens. 2018, 10, 777

10. Вікіпедія [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Sentinel-2

11. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/ Продовольча_та_сільськогосподарська_організація_ООН

12. Wang, W.; Liu, R.; Gan, F.; Zhou, P.; Zhang, X.; Ding, L. Monitoring and Evaluating Restoration Vegetation Status in Mine Region Using Remote Sensing Data: Case Study in Inner Mongolia, China. Remote Sens. 2021, 13, 1350.

13. Huang, C.; Davis, L.S.; Townshend, J.R.G. An assessment of support vector machines for land cover classification. Int. J. Remote Sens. 2002, 23, 725–749.

14. Shafri, H.Z.M.; Suhaili, A.; Mansor, S. The Performance of Maximum Likelihood, Spectral Angle Mapper, Neural Network and Decision Tree Classifiers in Hyperspectral Image Analysis. J. Comput. Sci. 2007, 3, 419–423.

15. Otukei, J.R.; Blaschke, T. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2010, 12 (Suppl. S1), S27–S31.

16. Forkuor, G.; Dimobe, K.; Serme, I.; Tondoh, J.E. Landsat-8 vs. Sentinel-2: Examining the added value of sentinel-2's red-edge bands to land-use and land-cover mapping in Burkina Faso. GISci. Remote Sens. 2017, 55, 331–354.

17. Thanh Noi, P.; Kappas, M. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. Sensors 2018, 18, 18.

18. Adugna, T.; Xu, W.; Fan, J. Comparison of Random Forest and Support Vector Machine Classifiers for Regional Land Cover Mapping Using Coarse Resolution FY-3C Images. Remote Sens. 2022, 14, 574.

19. Nguyen, H.T.T.; Doan, T.M.; Tomppo, E.; McRoberts, R.E. Land Use/Land Cover Mapping Using Multitemporal Sentinel-2 Imagery and Four

Classification Methods—A Case Study from Dak Nong, Vietnam. Remote Sens. 2020, 12, 1367.

20. Ruggeri, S.; Henao-Cespedes, V.; Garcés-Gómez, Y.A.; Uzcátegui, A.P. Optimized unsupervised CORINE Land Cover mapping using linear spectral mixture analysis and object-based image analysis. Egypt. J. Remote Sens. Space Sci. 2021, 24, 1061–1069.

ДОДАТОК А

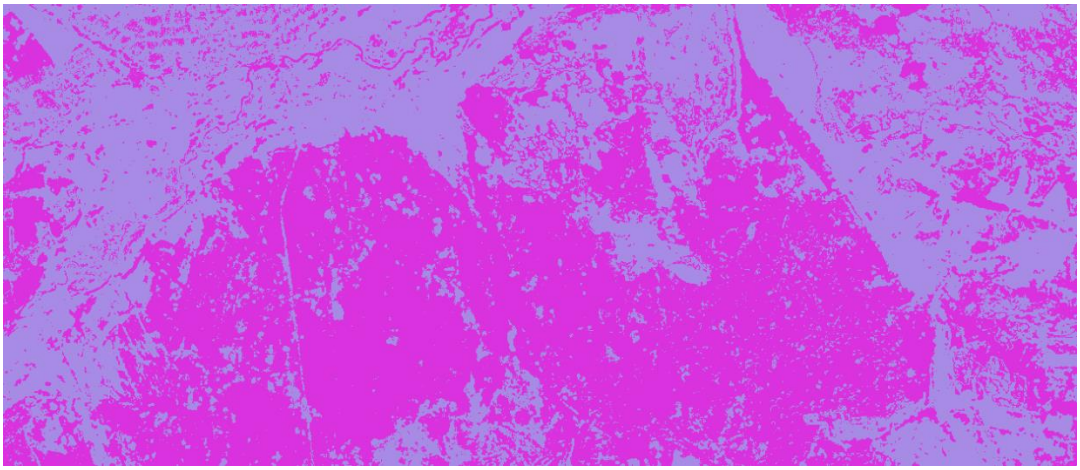


Рисунок А.1 - К-середні для змін лісового покриву

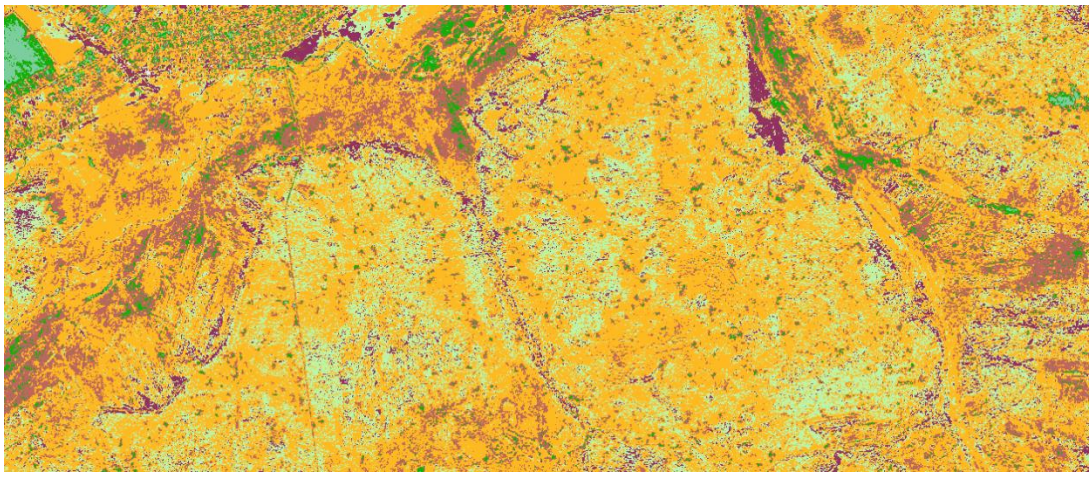


Рисунок А.2 - К-середні для EVI 2016 р.

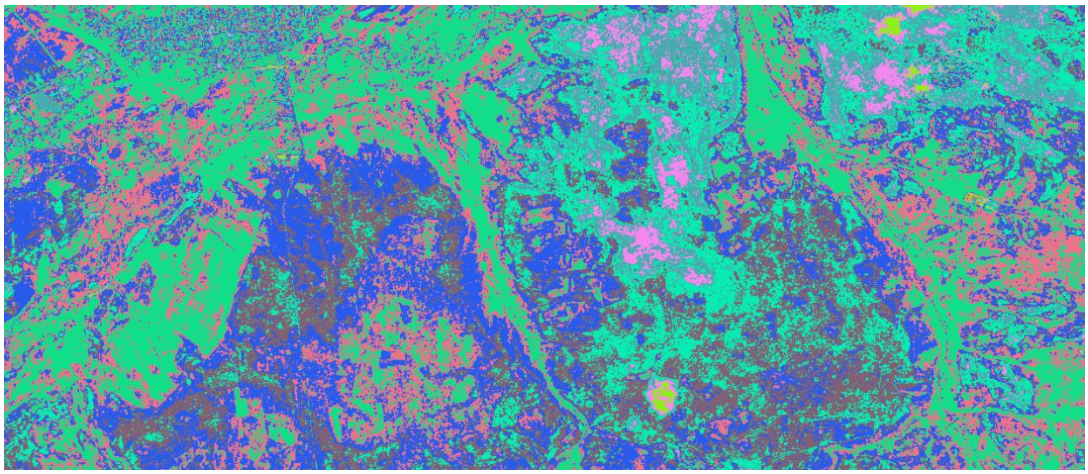


Рисунок А.3 - К-середні для EVI 2023 р.

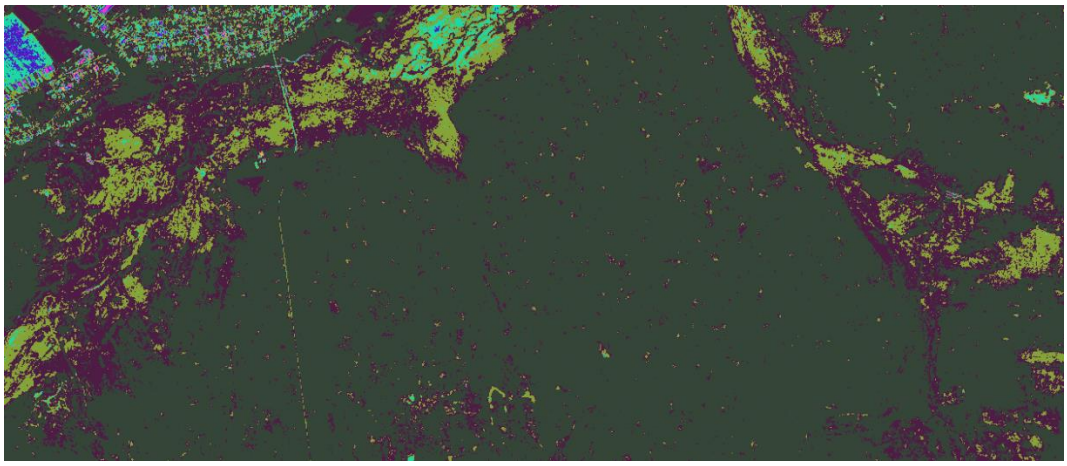


Рисунок А.4 - К-середні для NDVI 2016 р.

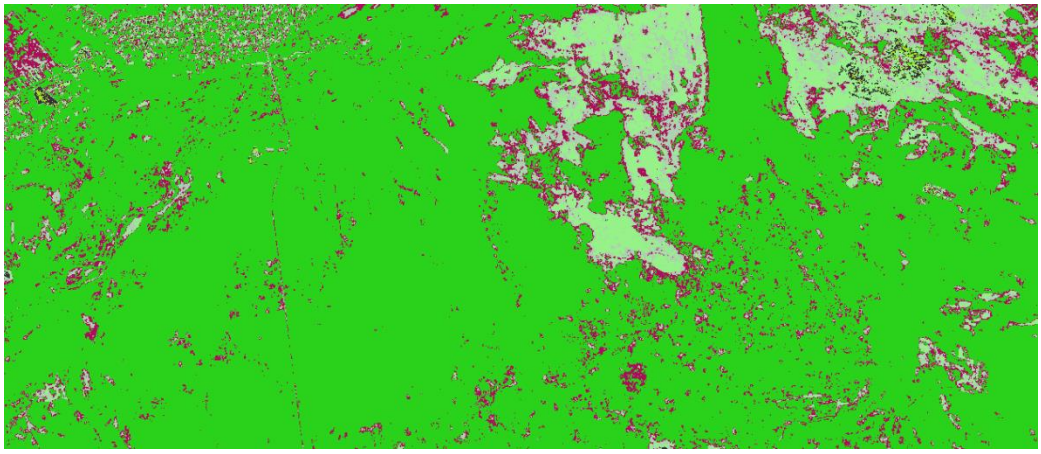


Рисунок А.5 - К-середні для NDVI 2023 р.

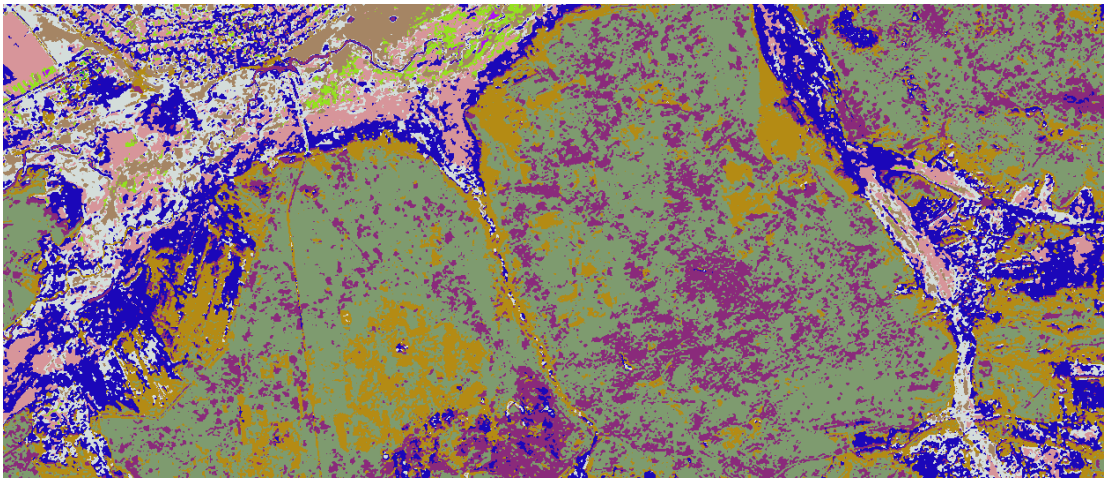


Рисунок А.6- К-середні для SWIR 2016 р.

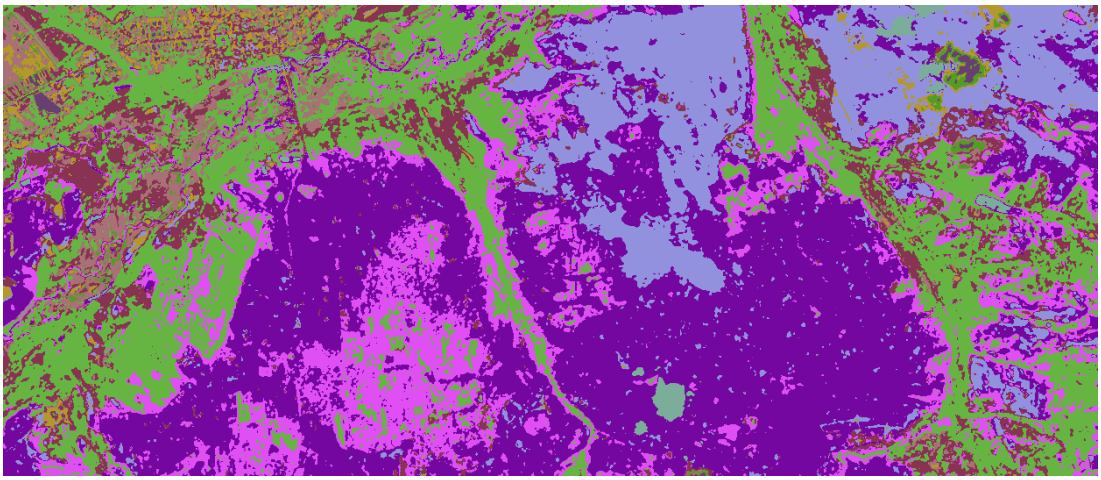


Рисунок А.7 - К-середні для SWIR 2023 р.

ДОДАТОК Б

Фрагмент лістингу

```
import matplotlib.pyplot as plt
# Дані для року 2016
channels = [1, 2, 3]
mean_values_2016 = [217.65, 178.38, 73.62]
std_deviation_2016 = [51.21, 51.25, 53.73]
# Дані для року 2023
mean_values_2023 = [88.32, 151.50, 165.82]
std_deviation_2023 = [85.93, 60.38, 45.61]
# Побудова графіку для середнього значення
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.errorbar(channels, mean_values_2016, yerr=std_deviation_2016, fmt='o',
color='b', label='2016 Mean Value')
plt.errorbar(channels, mean_values_2023, yerr=std_deviation_2023, fmt='o',
color='r', label='2023 Mean Value')
plt.xlabel('Channel Number')
plt.ylabel('Mean Value')
plt.title('Mean Values for K-means Classified Channels (2016 vs 2023)')
plt.legend()

# Додавання позначок для NVI, SWIR та EVI
plt.text(2.5, 200, 'NVI', color='g')
plt.text(2.5, 150, 'SWIR', color='m')
plt.text(2.5, 100, 'EVI', color='y')

plt.grid(True)
plt.show()
```