

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В.Н. КАРАЗІНА**

**Факультет геології, географії, рекреації і туризму**

***Кафедра фізичної географії та картографії***

*До захисту допустити*  
Зав. кафедри \_\_\_\_\_ доцент **Анатолій БАЙНАЗАРОВ**  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОРУШЕНЬ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ, СПРИЧИНЕНИХ БОЙОВИМИ  
ДІЯМИ (НА ПРИКЛАДІ БАХМУТСЬКОГО РАЙОНУ  
ДОНЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ)  
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

Виконав: студент 4-го курсу д.ф.н,  
групи ГК- 41  
спеціальність: 106 Географія  
освітня програма: Картографія, геоінформатика  
і кадастр  
**Артем Сергійович КОСТИЦЬ**  
Науковий керівник:  
**ст. викл. Андрій ПЛЮГІН**

*Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою*

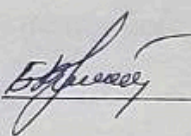
\_\_\_\_\_  
Голова ЕК **Олександр САВВІЧ**  
\_\_\_\_\_  
Секретар ЕК **Тетяна БУЛГАКОВА**  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**Харків – 2024**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В.Н. КАРАЗІНА


Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра фізичної географії та картографії


Зав. кафедри  До захисту допустити  
доцент Анатолій БАЙНАЗАРОВ  
«17» серпня 2024 р.

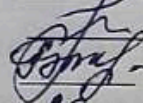
ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОРУШЕНЬ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ, СПРИЧИНЕНИХ БОЙОВИМИ  
ДІЯМИ (НА ПРИКЛАДІ БАХМУТСЬКОГО РАЙОНУ  
ДОНЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ)  
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Виконав: студент 4-го курсу д.ф.н,  
групи ГК- 41  
спеціальність: 106 Географія  
освітня програма: Картографія, геоінформатика  
і кадастр

 **Артем Сергійович КОСТИЦЬ** ✓

Науковий керівник:

ст. викл. Андрій ПЛЮГІН 

Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою  
93 (відмінно)  
Голова ЕК Олександр САВВІЧ  
 Секретар ЕК Тетяна БУЛГАКОВА  
«20» серпня 2024 р.

Харків – 2024

## ЗМІСТ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ВСТУП.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>РОЗДІЛ 1. СВІТОВИЙ ТА ВІТЧИЗНЯНИЙ ДОСВІД<br/>ЗАСТОСУВАННЯ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИХ ДАНИХ, ЗОКРЕМА<br/>ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОРУШЕНЬ ПРИРОДНОГО<br/>СЕРЕДОВИЩА.....</b> | <b>7</b>  |
| 1.1. Дослідження порушень, спричинених бойовими діями, за методами<br>ДЗЗ в світовому і вітчизняному досвіді.....  | 7         |
| 1.2. Світовий досвід застосування гіперспектральних даних в<br>моніторингу природного середовища.....  | 14        |
| 1.3. Узагальнення світового та вітчизняного досвіду за тематикою.....  | 23        |
| <b>РОЗДІЛ 2. ТЕРИТОРІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОСОБЛИВОСТІ<br/>МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>   | <b>27</b> |
| 2.1. Характеристика території, обраних ділянок та огляд типових<br>порушень сільськогосподарських угідь на них внаслідок бойових дій<br>.....                | 27        |
| 2.2. Гіперспектральні технології та їх можливості і для моніторингу<br>порушень.....   | 33        |
| 2.3. Методика гіперспектрального аналізу обраних ділянок.....  | 38        |
| 2.4. Підсумки загальних рис порушень території і переваг<br>гіперспектрального аналізу.....  | 49        |
| <b>РОЗДІЛ 3. ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОРУШЕНЬ<br/>СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ НА ТЕРИТОРІЇ<br/>ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>   | <b>51</b> |
| 3.1. Виявлення і оцінка пошкоджень на території дослідження за<br>обраною методикою .....  | 51        |
| 3.2. Верифікація результатів за мультиспектральними даними.....  | 67        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3. Висновки за результатами гіперспектрального аналізу території дослідження..... | 75        |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>  | <b>77</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>   | <b>80</b> |

## ВСТУП

**Актуальність.** З 2014 року російська збройна агресія негативно вплинула на сільськогосподарські угіддя, почавши бойові дії у східному регіоні, а саме у Донецькій і Луганській областях та анексувавши Крим. Російсько-українська війна 2022 року принесла нові виклики і загрози для розвитку сільського господарства. Але і в таких умовах український народ продовжує шукати нові шляхи стабілізації сільськогосподарських угідь, залучати інвестиції та працювати над вдосконаленням науково-технічної бази в сфері агропромислового виробництва.

За даними Міністерства аграрної політики та продовольства України, станом на 30 червня 2023 року внаслідок воєнних дій було пошкоджено понад 3,8 мільйона гектарів сільськогосподарських угідь. Із них 2,4 мільйона - забруднені мінами та іншими вибухонебезпечними предметами. Дані збитки є серйозним фактором, який впливає на сталий розвиток економічних процесів та продовольчої безпеки держави. Адже, Україна володіє однією з найбільших сільськогосподарських баз у Європі, і такі втрати в урожайності спричиняють зростання вартості продуктів харчування. Внаслідок цього з'являться проблеми гуманітарного забезпечення не тільки в регіонах у межах України, а й у світі.

Тому представлене дослідження направлене на швидке виявлення, подальший аналіз та ліквідацію пошкоджень сільськогосподарських угідь внаслідок бойових дій. Основним засобом для вказаної мети є гіперспектральний аналіз, який є складним, але ефективним методом дистанційного зондування Землі. Даний аналіз надає можливість контролювати ведення сільського господарства у різних умовах. Гіперспектральні зображення містять детальну інформацію про спектральні характеристики об'єктів на земній поверхні, що дозволяє ідентифікувати різні типи ґрунтів, рослинність та їх стан. Застосування гіперспектральних знімків є широким в агропромисловості: моніторинг та оцінка стану здоров'я рослин, визначення змін у складі ґрунтів,

раціоналізація використання добрив, прогнозування врожайності культур, фітосанітарний контроль та підвищення продуктивності сільськогосподарського виробництва.

Досліджуваний Бахмутський район Донецької області став епіцентром запеклих боїв, постраждав від масштабних руйнувань інфраструктури та зазнав значної деградації земельних ресурсів. Використання гіпеспектрального аналізу дозволить оцінити масштаби деградації ґрунтів, ідентифікувати ділянки з високим ризиком ерозії, забруднення та іншими негативними наслідками від активних бойових дій. Отримані результати можна використовувати для розробки стратегій та планів відновлення сільськогосподарського виробництва на постраждалих територіях.

**Об'єктом дослідження** є сільськогосподарські угіддя Бахмутського району Донецької області, які зазнали порушень через бойові дії.

**Предметом** є зміни територій сільськогосподарських угідь Бахмутського району, які спричинені внаслідок ведення воєнних дій, на основі використання гіперспектральних даних.

**Мета роботи** – виявити, проаналізувати та оцінити масштаби порушень сільськогосподарських угідь Бахмутського району, які з'явилися внаслідок активних бойових дій, з використанням гіперспектральних знімків.

**Завдання:**

1. Розкрити основи світового та вітчизняного досвіду використання гіперспектрального аналізу і даних ДЗЗ для дослідження пошкоджень поверхні Землі;
2. Охарактеризувати ділянки обраної території стосовно типових пошкоджень через бойові дії;
3. Визначити можливості гіперспектральних даних для загального вивчення пошкоджень за їх спектральним відгуком;
4. Ідентифікувати та оцінити порушення на сільськогосподарських угіддях, використовуючи гіперспектральний аналіз;

5. Провести верифікацію отриманих результатів за мультиспектральними даними.

**Методи дослідження**, які використовувалися у роботі: картографічний, геоінформаційний, метод дешифрування знімків, аналіз попереднього досвіду в вигляді літературних публікацій за тематикою «дослідження поверхні Землі за гіперспектральними знімками», статистичний аналіз площ за матеріалами дистанційного зондування, методи ГІС обробки даних, метод візуального аналізу гіперспектральних даних, класифікація супутникових знімків, метод векторизації растрових даних, метод підрахунку площ за векторними полігонами.

Окремі положення та твердження, викладені в цій роботі, були апробовані на міжнародній науково-практичній конференції студентів та аспірантів «Географічні дослідження: історія, сучасність, перспективи», присвяченої пам'яті професора Г. П. Дубинського в 2024 році.

Дана кваліфікаційна робота складається з вступу, 3 розділів, висновків та списку використаних джерел (65 найменувань). Обсяг роботи становить 87 сторінок друкованого тексту.

# **РОЗДІЛ 1. СВІТОВИЙ ТА ВІТЧИЗНЯНИЙ ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИХ ДАНИХ, ЗОКРЕМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОРУШЕНЬ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА**

## **1.1. Дослідження порушень, спричинених бойовими діями, за методами ДЗЗ в світовому і вітчизняному досвіді**

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є методом спостереження за нашою планетою за допомогою знімальної апаратури на космічних пристроях та літальних об'єктах, який дозволяє фіксувати зміни, збирати геопросторові дані та аналізувати процеси, що відбуваються на земній поверхні та в атмосфері. Отримана інформація з супутника використовуються для картографування Землі, вивчення та прогнозування глобальних явищ, а також для дослідження та оцінки стану природного середовища. На сьогодні майже вся територія земної та водної поверхонь фіксується космічною зйомкою при різних умовах спостереження.

Використовуючи різні методи ДЗЗ отримуються важливі та актуальні дані для моніторингу стану сільськогосподарських угідь України, які зазнали значних пошкоджень внаслідок ведення активних воєнних дій. Обстріли, мінування, зведення оборонних споруд, бомбардування та рух військової техніки погіршує родючість ґрунту, ускладнює обробку та нормальне функціонування аграрного виробництва. Бойові дії спричиняють масштабні пожежі, які винищують великі площі сільськогосподарських культур, що несе за собою знищення врожаю. Разом з тим, полум'я негативно впливає на землі, адже під впливом надмірних температур погіршуються їх корисні властивості та родючість. Тому, за допомогою ДЗЗ можна оперативно оцінювати вражені території та планувати необхідні заходи для нормалізації функціонування таких ділянок.

Супутникові дані доречно використовувати для проведення моніторингу водних ресурсів, які є важливими для зрошення, для виявлення зон зруйнованих

або забруднених водойм. Наприклад, теракт на *Каховській ГЕС*, де після підриву дамби російськими військовими, вода з Каховського водосховища пішла руслом Дніпра в Чорне море. В результаті одні території Херсонської області було затоплено, а інші, навколо самого водосховища, залишилися без води, що унеможливило ведення фермерського господарства, яке було ключовою економічною частиною даного регіону [1].

Вчені Ханг Сюй, Сільвен Барбо та Тенг Ван досліджували прорив Каховської ГЕС, який відбувся 6 червня 2023 року, що призвело до викиду 18 км<sup>3</sup> води в Чорне море та викликало масштабну повінь у нижній частині русла Дніпра в Херсонській області [2]. Ця повінь стала найбільшим природним лихом в Україні з часів вибуху Чорнобильської АЕС у 1986 році. Використовуючи оптичні супутникові зображення для оцінки пошкоджень Каховської ГЕС та моніторингу змін за течією річки Дніпро вище та нижче дамби (Рис. 1.4).

На даних знімках (Рис. 1.4) супутники забезпечують високоякісні зображення території та ландшафтів земної поверхні у видимому спектрі, використовуючи довжини хвиль від 0,4 до 0,6 м, подібно до фотографування з космосу. В даному дослідженні було використано оптичні зображення з супутників *Sentinel-2* і *Landsat-8*, наданих *ESA* і *NASA* відповідно. Спектрометр *Sentinel-2* забезпечує роздільну здатність 10 м у червоній, зеленій та синій смугах спектру [3]. *Landsat-8* має роздільну здатність 30 м для подібних діапазонів [4]. Поєднання зображень з цих датчиків дозволяє підвищити просторову та часову роздільну здатність для точності проведених спостережень.

Прорив Каховської дамби стався зі сторони лівого берега Дніпра, який контролювали російські війська (Рис. 1.4, В). в результаті було затоплено м. Олешки, с. Кардашинку, м. Гола Пристань та інші міста і села, які знаходилися в десятикілометровій зоні навколо заплави Дніпра (Рис. 1.4, С). Руйнування дамби призвело до осушення Каховського водосховища, яке використовувалося для живлення гідроелектростанцій, зрошувальних систем і Запорізької АЕС. Водосховище, ширина якого сягала 24 км, а глибина 24 м,

швидко втрачало воду, в результаті чого зневоднена заплава повільно висихала [5]. Завдяки інженерним особливостям, ставок-охолоджувач Запорізької АЕС зберіг свій рівень води, забезпечуючи охолодження ядерних реакторів (Рис. 1.4, D).

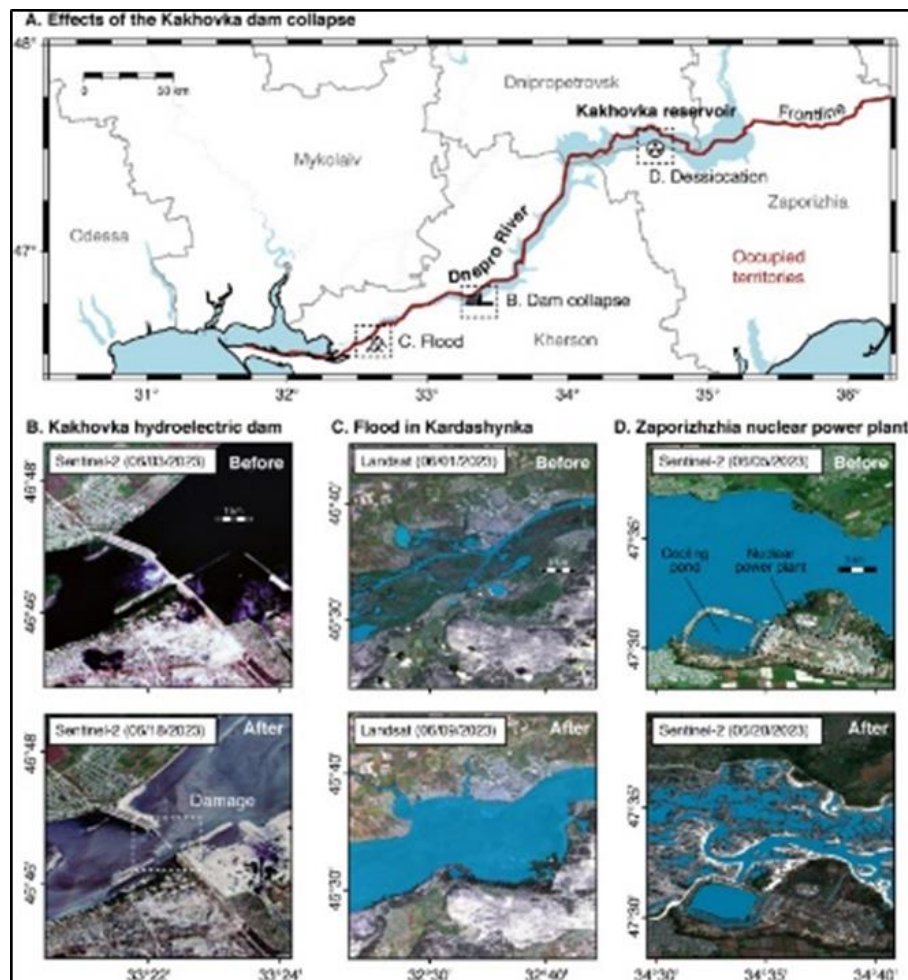


Рис. 1.4. Дистанційне зондування прориву Каховської дамби та його вплив на навколишнє середовище: А) Розташування Каховського водосховища, Каховської ГЕС, Запорізької АЕС вздовж річки Дніпро, Херсонська обл.; В) Зображення Каховської дамби до та після підриву 6 червня 2023 року, на яких видно знищення контрольованої Росією частини дамби; С) Масштаб затоплення нижньої частини русла Дніпра; D) Зображення Каховського водосховища до і після прориву, які демонструють осушення водосховища та наповненість ставка-охолоджувача поруч із Запорізькою АЕС [2]

Вагомим фактором, який заважає проводити обробку сільськогосподарських угідь після деокупації - це мінування територій, яке не тільки загрожує життю фермерів, а й сильно ускладнює обробку посівних площ. Саме супутникові знімки дають можливість ідентифікувати пошкоджені райони, що сприяє плануванню робіт по розмінуванню та відновленню земель. На ґрунти сильно впливають забруднення хімічними речовинами, які виливаються, розсипаються або утворюються внаслідок вибухів на території бойових дій. Дистанційне зондування Землі дозволяє вчасно виявити такі забруднення, оцінити масштаб проблеми та спланувати заходи по очищенню і відновленню.

Дистанційне зондування охоплює ще одну сферу застосування, а саме використовується для дослідження причин збройних конфліктів та їхнього впливу на навколишнє середовище. Одним з таких досліджень є стаття швейцарського доцента Стокгольмського університету Я. Брауна та інших фахівців в якій вивчали, чи зможе метод ДЗЗ підтвердити, що конфлікт у Дарфурі був пов'язаний із суперечками між громадами за ресурси. Їхній експеримент продемонстрував, що дистанційне зондування може ефективно перевіряти матеріали за даними з супутникових знімків. Я. Браун та дослідники [6] також вивчили, як ця технологія може допомогти дослідити та зменшити вплив на навколишнє середовище, спричинене збройним конфліктом. Війна призводить до сильного забруднення води і повітря, а також до деградації земель і втрати біорізноманіття. У висновку дослідження було доведено, що довгострокові екологічні наслідки провокують подальші конфлікти, якщо їх не вирішити. Тому розуміння важливості вивчення екологічних наслідків, які посилюються конфліктом, має вирішальне значення, як для запобігання конфліктам, так і для відновлення уражених територій. Негативний вплив збройних суперечок на природу важко оцінити, особливо у під час безпосередній воєнних дій. Тим не менш, ДЗЗ спростило і удосконалило оцінку впливу на довкілля в конфліктних ситуаціях, що суттєво допомагає з їх ліквідацією [7].

Дистанційне зондування охоплює чергову сферу застосування, а саме використовується для оцінки змін лісового покриву, який також зазнає значних пошкоджень під час ведення бойових дій. Ліси відіграють важливу роль в таких ситуаціях, слугуючи притулком, як для комбатантів, так і для цивільного населення. Під час конфліктів браконьєрство і вирубка лісів у незахищених ділянках зростають, створюючи загрозу для біорізноманіття [8]. Супутникові дані з високою роздільною здатністю можуть виявити зміни в лісовому покриві, біорізноманітті та розподілі видів. Прикладом для даного застосування є робота американського вченого В. Горсевського та співавторів [7], які використовували різночасові знімки *Landsat* для оцінки змін лісового покриву внаслідок кризи в Дарфурі (регіон заходу Судану) та конфлікту в Уганді. У своєму дослідженні вони розробили індекс порушень для моніторингу змін у Центральному лісовому заповіднику Іматонг у Південному Судані поблизу пагорбів Донготана та в Уганді лісовому заповіднику Агоро-Агу під час конфлікту, що охопив період 1980-2001 років, і в післявоєнний період у 2003-2010 роках. На підставі отриманих даних було виявлено вагому втрату лісового покриву під час конфлікту. Проаналізувавши отриману інформацію вченні прийшли до висновку, що незахищені ліси, такі як ліси на пагорбах Донготана, зазнали більших втрат порівняно із лісами, які знаходилися в природоохоронній зоні [7].

Під час збройних конфліктів використовується артилерія, авіація та стрілецька зброя, де в ході їх використання часто виникають займання територій. Пожежі, виявлені за допомогою супутникових знімків, слугують сигналами раннього попередження про гуманітарні кризи [9]. Збройні конфлікти руйнують інфраструктуру, населені пункти та економічну діяльність, змушуючи багатьох людей залишати свої домівки в пошуках притулку. Такі міграції зменшують екологічний тиск у місцях їхнього походження, але збільшують його в місцях базування. Дистанційне зондування є цінним інструментом для оцінки цього екологічного тиску, спричиненого припливом внутрішньо переміщених осіб (ВПО) і біженців. Дані *Landsat* були використані у Судані для виявлення згорілих

споруд у районах, що постраждали від етнічного насильства [10; 11]. У кенійській провінції Рифт-Веллі навчальний і науково-дослідний інститут ООН використав знімки спектрометра з помірною роздільною здатністю (*MODIS*), для визначення районів у яких було зафіксовано ознаки насильства після національних виборів у Кенії [12].

Ще однією галуззю застосування дистанційного зондування землі є визначення зміщення зміни ґрунтового покриву внаслідок переміщення людей, і для встановлення зв'язків між землеволодінням та землекористуванням [13]. При ретельному застосуванні, враховуючи достовірність вимірювань і похибки відбору, методи дистанційного зондування можуть оцінити сільськогосподарські втрати, деградацію і відновлення земель, порушення водних ресурсів і зміни в рослинності [14; 15; 16]. Аналізуючи численні супутникові знімки та інші додаткові зображення, Н. Левін та інші вчені [17] дослідили, що понад 5% з 1073 об'єктів Світової спадщини знаходяться під загрозою через гострі внутрішні конфлікти, а 25 з них перебувають в зоні ризику через безпосередні збройні конфлікти.

У минулому для відстежування пошкоджень об'єктів культурної спадщини використовувалися ручні методи інтерпретації супутникових знімків, які були тривалими і трудомісткими. Але сучасні досягнення в автоматичній класифікації супутникових знімків і методах виявлення змін пропонують перспективні альтернативи для моніторингу цих змін [18]. В інших наукових роботах різночасові супутникові знімки високої роздільної здатності застосовувалися для вивчення впливу на екосистему табору вимушених переселенців Зам Зам в Судані, який був створений через кризу в Дарфурі [19].

На (Рис. 1.5) представлені супутникові знімки згорілих ділянок, пошкоджених під час конфлікту в Судані у 2011 році. На знімку (Рис. 1.5 ,е) чітко ідентифікуються пошкоджені та вцілілі ділянки в регіоні Таджалей в Судані.

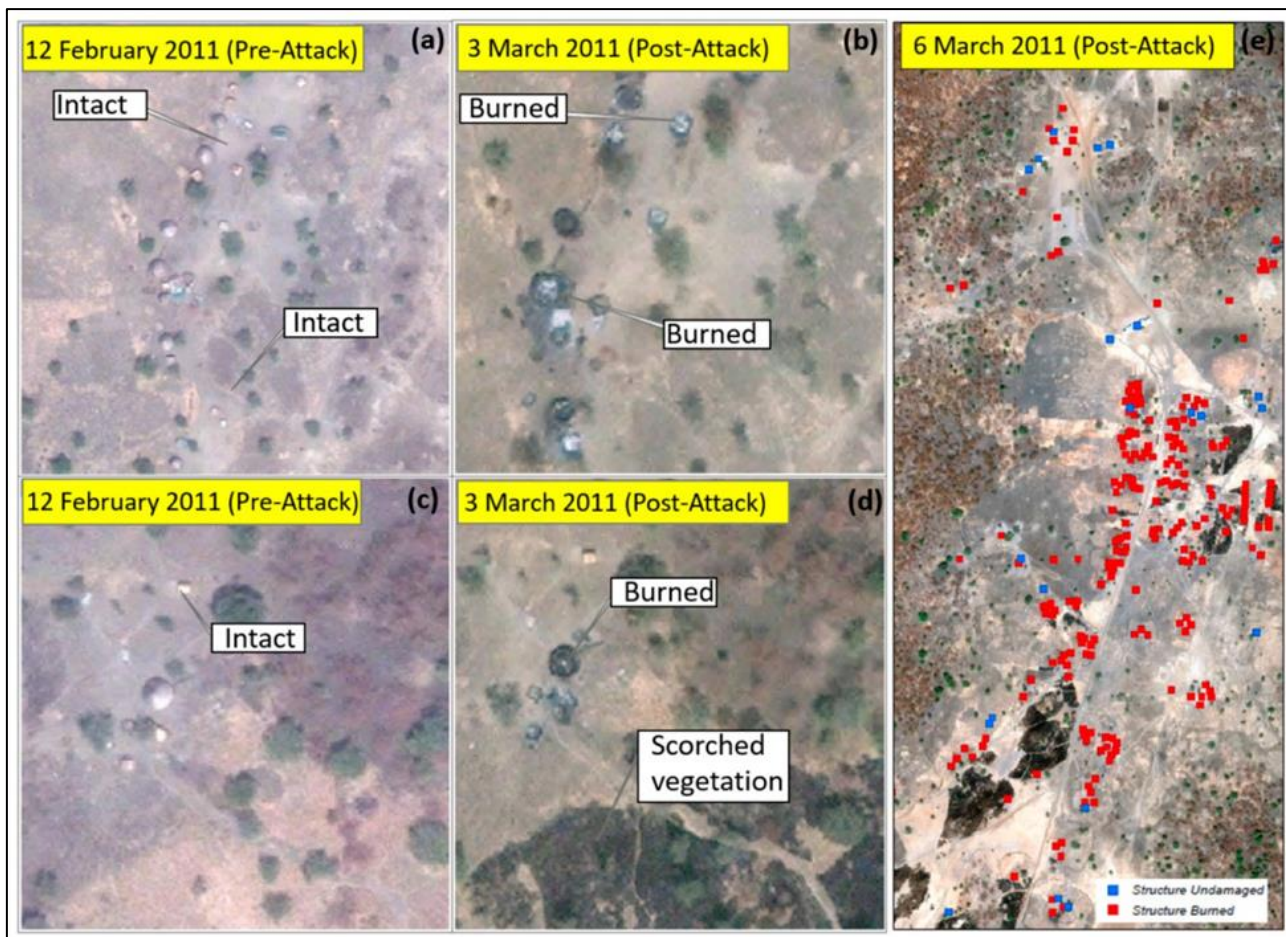


Рис. 1.5. Супутникові знімки зон конфлікту в Судані (а, с) - доконфліктні знімки від 12 лютого 2011 року з неушкодженими будівлями, а на знімках (b, d) - постконфліктні знімки, дата 3 березня 2011 року, на яких видно спалені будівлі в регіоні Макер-Ават. (e) - знімки Worldview 2 з зображеними пошкодженими і непошкоджені будівлями в районі Таджалея, дата 6 березня 2011 року [19]

Отже, використання ДЗЗ дуже розповсюджене в багатьох сферах діяльності та затребувані по всьому світу, набираючи з кожним роком більших обертів. Важливим фактором, який впливає на зростання популярності даної технології є оперативність отримання даних і їх точність.

## 1.2. Світовий досвід застосування гіперспектральних даних в моніторингу природного середовища

Гіперспектральне дистанційне зондування є, у певному сенсі, остаточною оптичною дистанційною технологією зондуванням. Воно прагне унікально ідентифікувати та відобразити матеріали поверхні Землі. Вимірювання безперервних спектрів відносно високої роздільної здатності кожного пікселя в просторові зображення поверхні з високою спектральною роздільною здатністю. Гіперспектральні дані використовують для прямої та непрямой ідентифікації поверхні, матеріалів та вмісту атмосферних газів, вимірювання їх відносних концентрацій і подальше призначення пропорційного внеску змішаних піксельних сигналів, визначення їхнього просторового розподілу та, нарешті, їх еволюція з часом (мультичасовий аналіз). Датчики, які використовуються для отримання гіперспектральних даних, називаються спектрометрами [20].

Робота сучасного візуалізаційного спектрометра заснована на принципі *pushbroom*. Тобто, він будує зображення скануванням цілого просторового рядка за раз. Таким чином, можна виділити наступні найважливіші характеристики сенсора спектрометра це:

- спектральний діапазон;
- спектральна роздільна здатність;
- просторова роздільна здатність;
- відношення сигнал/шум;

Спостереження Землі, засноване на спектроскопії зображень, трохи змінилося більш ніж два за десятиліття з малодоступного дослідницького інструменту в товарний продукт доступний для широкої спільноти користувачів. В основному це пов'язано з значний прогресом у сенсорних технологіях.

Перший спектрометр зображення *AISA* виробництва *Specim Ltd.*, був представлений у 1995 році. Його можливостями було записувати гіперспектральні дані в 17 каналах довжини хвилі. Уже сьогодні остання модель

спектрометра від *Specim Ltd.*, *AISA Dual*, дозволяє дослідникам отримувати дані в 492 каналах довжини хвилі.

Відношення сигнал/шум (*SNR*) є ще однією характеристикою, де був досягнутий величезний прогрес в розробці датчиків. Прикладом такого досягнення є спектрометр *AVIRIS*, розроблений Лабораторією реактивного руху *NASA*. На початку 1990-х років співвідношення сигнал/шум могло вимірюватися від десятків до сотень залежно від області довжини хвилі. Відтоді *AVIRIS* розвивався шляхом серйозних оновлень і постійного налаштування апаратного та програмного забезпечення, щоб забезпечити спектр ефективним співвідношенням сигнал/шум, характеристики якого сягають від кількох сотень до тисяч.

В сучасних умовах дослідники мають змогу застосовувати узгоджені методології гіперспектрального аналізу в галузі дистанційної хімії, тоді як попередні дослідження зі старішою технологією *AVIRIS* не могли це зробити. Такого роду вдосконалення було досягнуто і з іншими датчиками [21]. Раніше це був звичний спектральний діапазон гіперспектральних датчиків, який обмежувався видимим і інфрачервоним діапазонами області електромагнітного спектру. Сьогодні всі широко використовувані датчики, тобто *AVIRIS*, *AISA* і *CASI* дозволяють отримувати дані, знімаючи спектри від видимого до короткохвильового в інфрачервоній області (400-2500 нм). Досягнення сенсорної технології також уможливили використання кращої просторової роздільної здатності при зборі даних. Тепер час і витрати, необхідні для отримання даних з певною просторовою роздільною здатністю, значно менше ніж це було раніше [22].

У природному середовищі рослини - це один з найкращих показників, які відображають порушення сільськогосподарських угідь. Провівши аналіз, їх можна використовувати як один з основних маркерів пошкоджень. У такому випадку гіперспектральне зображення є потужною технікою, яка дозволяє детально аналізувати рослинність шляхом захоплення та аналізу спектральної

інформації з широкого діапазону довжин хвиль [23]. Ця передова технологія зробила революцію в галузі дистанційного зондування, дозволяючи дослідникам вивчати характеристики рослинності з безпрецедентною точністю.

Гіперспектральне зображення пропонує численні переваги для аналізу рослинності, включаючи покращене розрізнення видів, покращене виявлення рівнів впливу та точну оцінку параметрів рослинності. Висока спектральна роздільна здатність гіперспектральних даних дозволяє ідентифікувати та диференціювати різні види рослин на основі їхніх унікальних спектральних ознак. Ця можливість особливо корисна в екологічних дослідженнях та моніторингу біорізноманіття.

Крім того, гіперспектральні зображення надають цінну інформацію про фізіологічний стан рослинності. Аналізуючи специфічні спектральні смуги, пов'язані з вмістом хлорофілу, водним стресом і поглинанням поживних речовин, дослідники можуть виявити ранні ознаки стресу або хвороби рослин. Ця інформація дозволяє своєчасно втручатися та стратегії управління для пом'якшення потенційних ризиків та покращення продуктивності сільськогосподарських культур [24].

Гіперспектральні дані також використовуються для оцінки параметрів рослинності, таких як індекс площі листя (*LAI*), біомаса та вміст вологи в рослинності. Вказані параметри мають вирішальне значення для моніторингу здоров'я екосистеми, кількісного визначення поглинання вуглецю та оцінки ризиків пожежі. За допомогою гіперспектрального зображення дослідники можуть отримати точну та просторово чітку інформацію про ці параметри, що веде до більш обґрунтованого прийняття рішень та ефективного управління ресурсами.

Одним із найпопулярніших і поширених показників є нормалізований різницевий вегетаційний індекс (*NDVI - Normalized Difference Vegetation Index*), який використовується для вимірювання загального стану здоров'я сільськогосподарських культур. Він розраховується за допомогою простого

співвідношення ближнього ІЧ-діапазону та видимого світла. *NDVI* використовувався для багатьох різних цілей, наприклад, для виявлення стресу, спричиненого шкідниками або воєнними діями [25].

Більшість індексів дуже специфічні та добре працюють лише з наборами даних для яких вони розроблені. Існують наукові роботи, які орієнтовані на захворювання та зосереджені на створенні індексів стану рослин, до прикладу, для виявлення та кількісного визначення конкретних патологій. Наприклад, в дослідженні [26] було використано індекс тяжкості захворювання листової іржі (*LRDSI*) з точністю 87–91% для виявлення листової іржі (*Puccinia triticina*) у пшениці, однак, за останніми даними, він не був широко застосований в практиці.

Іншим поширеним підходом є виявлення змін у раптовому збільшенні коефіцієнта відбиття на межі червоного/ближнього інфрачервоного діапазону. Ця позиція «червоного краю» є вузькою ділянкою в електромагнітному спектрі (690–740 нм), де закінчується видимий спектр і починається ближній інфрачервоний. Цей розділ має значну зміну спектрального відгуку (похідної) для зеленого рослинного матеріалу, оскільки хлорофіл сильно поглинає хвилі з довжиною хвилі приблизно до 700 нм (Рис 1.1), отже, матеріал має низький коефіцієнт відбиття в цьому діапазоні, але він сильно відображає інфрачервоне випромінювання (орієнтовно від 720 нм) [27]. Індекс хвороби, заснований на положенні червоного краю, використовувався для виявлення борошнистої роси на пшениці (*Blumeria graminis f. sp. Tritici*), однак він був не таким точним, як часткова регресія найменших квадратів (*PLSR*), метод, який використовує статистичний підхід [28]. Деякі з цих статистичних підходів будуть розглянуті далі в дослідженні.

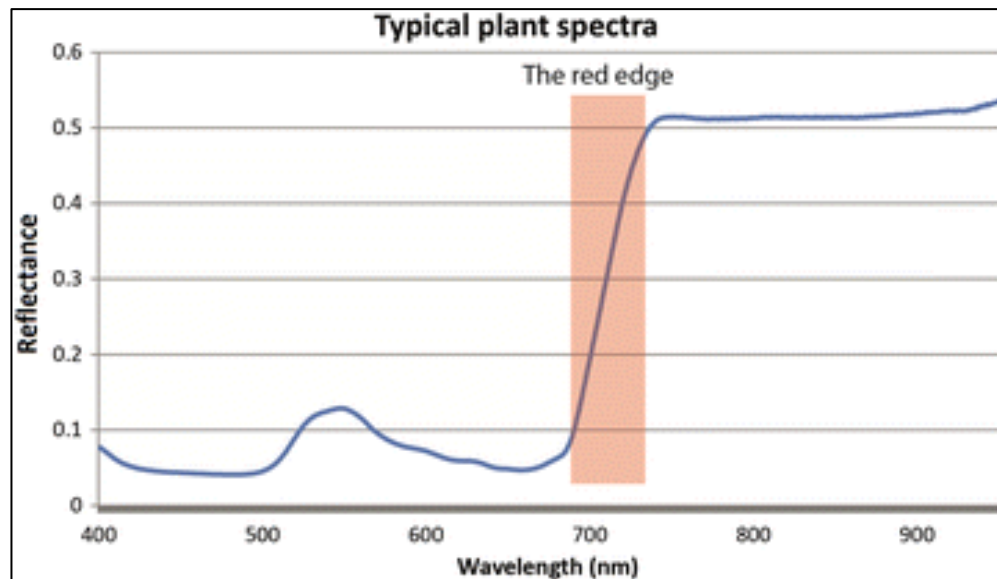


Рис. 1.1. Типовий спектр здорової рослинності (400–1000 нм) з червоним краєм, виділеним червоним (690–740 нм) [27]

Для схожих досліджень використовують також і мультиспектральні знімки, які являються попередниками гіперспектральних, але відрізняються кількістю фіксованих каналів та обмеженістю технологій застосування. Одна з таких відмінностей гіперспектру полягає в тому, що конкретні довжини хвиль можна вибрати вручну або автоматично з будь-якої точки захопленого діапазону, а мультиспектральні дані такої можливості не мають.

Аналіз зазвичай використовує індекси для обчислення репрезентативних значень з використанням дискретних довжин хвиль у різних положеннях у спектрі. В одному такому дослідженні, що включало експеримент на пшеничному полі, використовувався нормалізований різницевий індекс вегетації (*NDVI*), щоб виключити все, крім листя, з набору даних, а потім статистичний підхід, який називається *ANCOVA* (який вимірює статистичну коваріацію), щоб визначити вибрані діапазони довжин хвиль, а потім квадратичний дискримінантний аналіз (*QDA*) для класифікації спектрів між здоровими та хворими листками (жовта іржа) [29]. Це типовий робочий процес у гіперспектральному аналізі: ізолювати (або сегментувати) частини зображення, що цікавлять, потім використовувати математичний метод для визначення

областей спектру, які, ймовірно, мають передбачувану яскравість, і, нарешті, використовувати ці просторові та спектральні області, щоб вивчити класифікаційний підхід. Використовуючи *QDA*, загальна точність досягла 92% з 4 діапазонами хвиль.

Приклад багат шарових персеPTRонів (*MLP*) описано Дмітріусом Мошоу [30], який мав на меті виявити жовту іржу в пшениці, вирощеній у полі, використовуючи спектрограф з діапазоном 460–900 нм і спектральною роздільною здатністю 20 нм. Спектрограф фіксував зображення в польових умовах за допомогою портативної системи. Потім було обрано чотири значущі довжини хвилі. Перші дві довжини хвилі були обрані за допомогою «відбору змінних», який передбачав порівняння довжин хвиль за допомогою покрокового дискримінантного аналізу та використання F-тесту. Друга пара довжин хвиль використовує довжини хвиль *NDVI*. Нейронна мережа, яку використовує Д. Мошоу, є простою архітектурою з чотирма входами, одним прихованим шаром, що складається з десяти нейронів, і двома виходами («здоровим» і «хворим» класами). Архітектура визначається кількістю входів, вибраною кількістю прихованих нейронів і необхідною кількістю виходів. Методом проб і помилок можна визначити відповідну архітектуру. Д. Мошоу спробував різні кількості нейронів і вибрав найефективніший. Точність класифікації, досягнута за допомогою цього підходу, становила 98,9% для здорових рослин і 99,4% для хворих рослин.

Гіперспектральне зображення полегшує вивчення біологічних компонентів у водоймах. Водні екосистеми є домом для широкого спектру організмів, включаючи фітопланктон, зоопланктон і підводну рослинність. Кожен із цих організмів має специфічну спектральну сигнатуру, яку можна зафіксувати та проаналізувати за допомогою гіперспектральних датчиків. Дослідники, вивчаючи гіперспектральні дані, мають змогу ідентифікувати та класифікувати різні види, контролювати їх поширення та чисельність, а також вивчати їхні екологічні взаємодії. Така інформація має вирішальне значення для

розуміння моделей біорізноманіття, динаміки екосистем і впливу змін навколишнього середовища на водні організми [31].

Одним із ключових застосувань гіперспектральних знімків в аналізі водойм є виявлення та моніторинг параметрів якості води. Різні речовини у воді демонструють унікальні спектральні ознаки, які можна ідентифікувати та кількісно визначити за допомогою гіперспектральних даних. Аналізуючи конкретні довжини хвиль, де ці речовини мають чіткі характеристики поглинання або відбиття, можна виявити наявність забруднюючих речовин, таких як зважені відкладення, водорості або хімікати. Дані дослідження допомагають оцінювати якість води, визначати джерела забруднення та розробляти відповідні стратегії управління для підтримки або покращення стану води.

Крім того, гіперспектральне зображення дозволяє ідентифікувати та картографувати занурені особливості та типи дна у водоймах. Аналізуючи відбите або пропущене світло від товщі води, можна розрізнити різні субстрати дна, такі як пісок, каміння або рослинність. Ці дані важливі для застосувань у картографуванні середовищ існування, управлінні прибережними зонами та у підводній археології. Знання про особливості складу та структури дна моря чи озера дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо управління ресурсами щодо їх збереження та майбутніх проєктів розвитку узбережжя.

Ще однією перевагою гіперспектрального знімку є його здатність спостерігати за водними об'єктами в часі. Отримавши повторні гіперспектральні зображення, можна відстежувати та аналізувати зміни якості води, росту рослинності та інших параметрів. Цей поздовжній метод надає актуальні дані для визначення тенденцій, виявлення аномалій та оцінки стратегій управління. Наприклад, дослідники можуть оцінити ефективність заходів контролю забруднення, спостерігаючи за реакцією водойми протягом певного часу. Відповідно, вплив зміни клімату або діяльності людини на водні об'єкти можна вивчати за допомогою тривалого гіперспектрального моніторингу.

Точні оцінки параметрів водних ресурсів можливі за допомогою аналізу просторових, спектральних і часових коливань водних тіл. Науковці систематично представляють свої дослідження ключових технологій, пов'язаних із надійною гіперспектральною системою моніторингу водних ресурсів. Дана робота була використана для оцінки концентрації шкідливих речовин в затоці Мейлянг озера Тайху, що знаходиться у Китаї, за допомогою даних *CHRIS* [32], як показано на (Рис. 1.2).

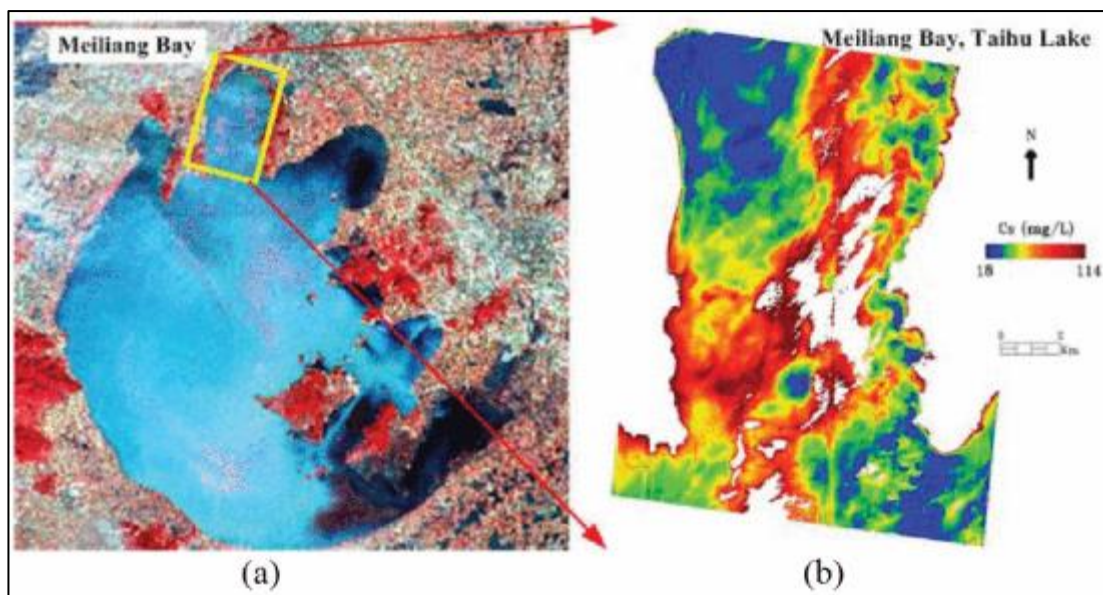


Рис. 1.2. Розподіл шкідливих речовин в затоці Мейлян оз. Тайху [13]

Саме гіперспектральне дистанційне зондування надає ефективну та надійну інформацію про параметри якості води, які містять біохімічні, гідрофізичні та біологічні характеристики. *HSI* дозволяє вимірювати хлорофіл, каламутність і хімічну потребу в кисні та фосфорі у водних ресурсах [33]. Вміст хлорофілу у воді широко вивчається за допомогою гіперспектрального дистанційного зондування, яке дає оцінку рівня водоростей і, отже, якості води.

Отже, гіперспектральне зображення є потужним інструментом для аналізу водних тіл, що надає детальну інформацію про їхній склад, характеристики та умови навколишнього середовища. Ця вдосконалена техніка візуалізації фіксує широкий діапазон електромагнітних хвиль, дозволяючи виявляти та відображати різні особливості та речовини у воді.

Окрім досліджень рослинності та водних об'єктів гіперспектральні знімки знайшли застосування в наступних галузях (Рис. 1.3).

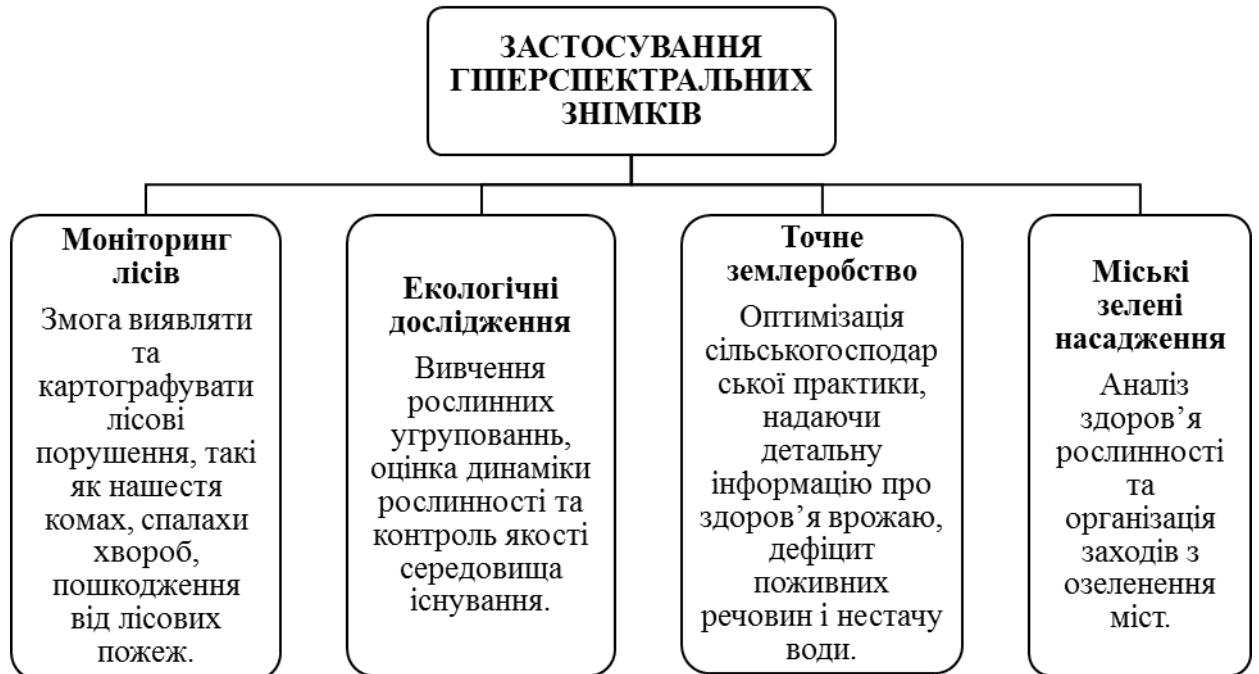


Рис.1.3. Сфери застосувань гіперспектральних знімків (узагальнено автором)

Таким чином, досвід застосування гіперспектральних даних в моніторингу природного середовища охоплює широке коло сфер. Завдяки цим даним дослідники можуть спостерігати за змінами у різних проміжках часу, оцінювати динаміку росту, якість середовища існування та його вплив, що дає інформацію для оптимізації та розробок ефективних, актуальних стратегій для відновлення, збереження та покращення загальних умов.

### 1.3. Узагальнення світового та вітчизняного досвіду за тематикою

Дистанційне зондування Землі розвивається досить давно і знайшло застосування в багатьох галузях людського життя (Рис.1.6) Ці технології мають потенціал для вирішення багатьох проблем, з якими стикається і створює людство.

ДЗЗ включає в себе різні види зйомок: мультиспектральні, радарні, лідарні та гіперспектральні, що дає можливість використовуючи різні типи даних проводити максимально точні дослідження. Масштабне застосування отримуваних даних для вивчення і вирішення світових проблем, підтверджує ефективність цих технологій.



Рис. 1.6. Сфери використання ДЗЗ (побудовано автором)

ДЗЗ використовується для оцінки наслідків російсько – української війни. Бойові дії, що відбуваються на території України, призводять до значних руйнувань сільськогосподарських угідь: забруднення земель, зменшення їх родючості, ускладнення у обробці, знищення посівів, мінування, що обмежує доступ до полів. Саме дистанційне зондування дозволяє оперативно оцінювати

масштаби пошкоджень та планувати заходи з відновлення постраждалих територій.

Під час дослідження підриву Каховської гідроелектростанції ДЗЗ зарекомендувало себе, як потужний інструмент для аналізу великих площ. Супутникові знімки допомогли оцінити масштаби затоплення територій та зневоднення басейну водосховища. На основі цих даних з'явилась можливість оперативно та об'єктивно оцінити шкоду завдану затопленим територіям, а також визначити території, які постраждали в наслідок осушення водосховища.

Дослідження конфлікту в Дарфурі (Судан) показало ефективність використання даних ДЗЗ для вивчення не лише природних катастроф, а і конфліктів між людьми. Саме за знімками з супутнику *Landsat* було доведено, що суперечка між громадами виникла в наслідок боротьби за ресурси. За супутниковими знімками було ефективно виявлено вплив конфліктів на навколишнє середовище, включаючи водні ресурси та ліси, які зазнали значних пошкоджень під час ведення активних бойових дій. Супутникові дані з високою роздільною здатністю дали можливість виявити пошкодження лісового покриву, зміни біорізноманіття та особливості розміщення населення.

Застосування даних дистанційного зондування дає можливість за допомогою різних видів спектрометрів детально досліджувати пошкоджені території на яких безпосередньо відбувалися бойові дії. Ефективне виявлення пожеж, які виникають в наслідок застосування зброї, також це ефективний засіб раннього виявлення гуманітарних криз, оцінка екологічного тиску через переміщення людей, виявлення мінування та пошкоджених районів, сприяючи розмінуванню і розробці планів по відновленню земель. Виявляє забруднення ґрунтів хімічними речовинами для їх дослідження та планування заходів з очищення.

Одним зі способів ДЗЗ є гіперспектральна зйомка. В певному сенсі, це найсучасніша оптична технологія дистанційного зондування. Гіперспектральне зондування використовує спектрометри для вимірювання безперервних спектрів

з високою роздільною здатністю для кожного пікселя просторових зображень поверхні Землі. Ця технологія дозволяє унікально ідентифікувати та картографувати матеріали земної поверхні, а також проводити аналіз їх змін з часом. Сучасні спектрометри, такі як *AISA Dual* від *Specim Ltd.* та *AVIRIS* від *NASA*, забезпечують високу спектральну роздільну здатність і відношення сигнал/шум, що дозволяє застосовувати узгоджені методології гіперспектрального аналізу в галузі дистанційної хімії.

Гіперспектральна зйомка знайшла широке застосування і в аналізі рослинності. Вона дозволяє детально аналізувати стан рослинності, ідентифікувати види рослин, виявляти рівні стресу, також оцінювати параметри рослинності, такі як індекс площі листя (*LAI*), біомаса та вміст вологи. Застосування індексу *NDVI* використовують для вимірювання загального стану здоров'я сільськогосподарських культур на який впливають шкідники чи воєнні дії.

В дослідженні водних об'єктів гіперспектральна зйомка теж знайшла своє місце. Аналізуючи специфічні відбиті хвилі, можна ідентифікувати наявність різних забруднювачів, таких як важкі метали, водорості або хімікати, бо речовини у воді мають чіткі характеристики поглинання чи відбиття. Це дає змогу дистанційно оцінювати якість води, визначати джерела забруднення та розробляти відповідні стратегії управління для підтримки або покращення стану водних об'єктів. Гіперспектральні знімки дозволяють вивчати біологічні компоненти у водоймах, такі як фітопланктон, зоопланктон і підводна рослинність. Ідентифікувати різні види, досліджувати їх поширення та чисельність, а також вивчати їх взаємодії.

Окрім вищезгаданих сфер, гіперспектральне зондування застосовується в моніторингу лісів, екологічних дослідженнях, точному землеробстві та аналізі міських зелених насаджень. Тут гіперспектральні дані дозволяють виявляти лісові порушення, як спалахи хвороб і наслідки лісових пожеж, досліджувати рослинні угруповання, аналізувати динаміку рослинності та відслідковувати

якість середовища їх існування, отримувати інформацію про здоров'я посівів, дефіцит поживних речовин або нестачу води у ґрунтах, аналізувати розташування і стан зелених насаджень. Дані дослідження використовуються для планування, комплексного розуміння впливу антропогенних факторів середовища, створення стратегій та загального покращення умов для життя.

На основі вищезазначеного, можна зробити висновок, що гіперспектральна зйомка є найдосконалішим видом ДЗЗ. Завдяки великій кількості каналів, які записують гіперспектральні спектрометри, можна практично і якісно аналізувати фізичний та хімічний склад різних матеріалів, об'єктів та поверхонь.

## РОЗДІЛ 2. ТЕРИТОРІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОСОБЛИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Характеристика території, обраних ділянок та огляд типових порушень сільськогосподарських угідь на них внаслідок бойових дій

У якості досліджуваної території виступає Бахмутський район Донецької області, розташований у східній частині України. Він межує з Краматорським та Горлівським районами Донецької області та Луганською областю, що робить його важливим регіоном у цій частині країни. Місто Бахмут - адміністративний центр району, який має багату історію і важливе значення для регіону.

Природні ресурси Бахмутського району відзначаються великою різноманітністю, що дає багато можливостей для економічного зростання. Територія відома своїми значними запасами корисних копалин таких, як вугілля, глини, пісок, крейда, сіль. Завдяки цим факторам видобувна промисловість, яка є однією з найважливіших галузей економіки району, активно розвивається. Сприятливі географічні умови, а саме переважно рівнинний ландшафт, впливають на активне ведення сільськогосподарської діяльності.

Бахмутський район має добре розвинену транспортну інфраструктуру. Зв'язок з іншими регіонами України забезпечує щільна мережа автомобільних доріг та залізниць. У районі функціонують автовокзали та залізничні станції, що сприяє зручному та ефективному сполученню для підприємств та місцевому населенню.

Розвинена транспортна інфраструктура та значні природні ресурси роблять Бахмутський район важливим промисловим і сільськогосподарським центром Донецької області. Це позиціонує його як важливий регіон для розвитку економіки та покращення якості життя місцевого населення.

Бахмутський район потрапив під вплив війни ще у 2014 році, саме тоді почався вплив бойових дій на територію області [34]. Найбільших пошкоджень даний регіон отримав під час повномасштабного вторгнення 2022 року.

Внаслідок активних бойових дій, обстрілів та окупації сільськогосподарські підприємства Бахмутського району зазнали значних втрат виробничого потенціалу: зруйновані ферми, техніка, втрачено худобу та сільськогосподарське угіддя. Через це практично всі сільгоспідприємства району призупинили свою роботу. Станом на 2023 рік у Бахмутському районі функціонувала одна ферма - «Журавушка 2006» [35]. Внаслідок важких боїв більшість населених пунктів району знищено, включаючи обласний центр – м. Бахмут, а поля навколо них зазнали масштабних пошкоджень. Така активність застосування зброї значно погіршує стан ґрунту, що в подальшому впливає на його якість та родючість.

Через війну не використовується та забруднено більше 5 млн га українських сільськогосподарських земель [36]. Тому, забруднення ґрунтів науковці поділяють на чотири типи (таблиця 2.1)

Таблиця 2.1.

Типи забруднення ґрунтів під час бойових дій (побудовано за даними [37; 38; 39])

| <b>Типи забруднення</b> | <b>Причина</b>  | <b>Наслідки</b>  |
|-------------------------|---|--|
| <i>Механічний</i>       | Забруднення від битого скла, руху військової техніки, будівництва фортифікаційних споруд, наслідки від вибухів. | Зміна структури ґрунтового покриву, яка змішується з іншими шарами. Схильність до ерозій: водної та вітрової. Втрата корисних властивостей, що утримували вологу. Зменшується придатність для сільського господарства. |
| <i>Фізичний</i>         | Рух військової техніки, пожежі, вибухи, забруднення радіостронцієм.   | Зміна фізичних властивостей земель. Підвищення температури, що негативно діє на рослинний покрив та тваринний світ. Дані організми впливають на стан і здоров'я ґрунту, від них також залежить родючість.              |
| <i>Хімічний</i>         | Осідання продуктів горіння та хімічні речовин з боєприпасів у землях, витікання палива.                         | Забруднення ґрунтового шару, деградація земель, втрата родючості.  |
| <i>Біологічний</i>      | Застосування вибухонебезпечних токсичних речовин, рух військової техніки, що ущільнює ґрунт, теплові удари.     | Знищення ґрунтової мікрофлори та мікрофауни, які відповідають за стан та якість ґрунту.  |

Отже, внаслідок бойових дій відбувається кожен з типів руйнування ґрунтів. Вони проявляються під час воєнно-техногенного навантаження, яке полягає у деформації ґрунтового покриву під час руху військової техніки, будівництва споруд, бомбардування, артобстрілів та інших воєнних дій. Основний вплив включає ущільнення з пошкодженням гумусового шару, що призводить до порушення водного балансу ґрунту та сприяє ерозії. Руйнування структури ґрунту відбувається через зсув частинок, це має негативний вплив на розвиток рослин та їх пристосування до змін клімату та умов вологості [40]. Ущільнення ґрунту робить його більш стійким до подальших воєнно-техногенних навантажень, але при цьому може викликати проблеми з адаптацією рослин. Деформації ґрунтового покриву виникають через будівництво фортифікаційних споруд, що може провокувати нехарактерні геоморфологічні процеси, такі як зсуви, заболочування та осідання. Під час побудови фортифікаційних споруд важливим фактором є глибина залягання ґрунтових вод та умови зволоження ґрунту [41].

На території дослідження присутні значні площі пошкоджених сільськогосподарських угідь. Самі пошкодження представлені у виді: вирв від снарядів (Рис. 2.1), вигорілих ділянок (Рис. 2.2), викопаних окопів (Рис. 2.3), слідів руху важкої техніки (Рис. 2.4).

На даному рисунку 2.1, за кількістю вирв від снарядів на околицях с. Трипілля, які видно, можна візуально оцінити активність бойових дій на даній території.



Рис. 2.1. Поле вкрите вирвами від снарядів на околицях с. Трипілля  
Донецької області (дані: Махар Technologies)

Особливістю воєнних дій є будівництво окопів, що є ефективний способом у маскуванні військових (рис.2.3.)[42]. Але їх вплив має серйозні наслідки для природи та сільського господарства. Видалення верхнього шару ґрунту призводить до порушення його структури та зменшення родючості через втрату поживних речовин. Наслідки, які за собою несуть оборонні споруди мають і короткостроковий, і довгостроковий вплив на здатність ґрунту підтримувати рослини та інші організми. Розташування окопів, траншей, сховищ, спричиняє зміни в рельєфі та роблять його схильним до вимивання водою та вітром, а також до забруднення речовинами, такими як боєприпаси, паливо, мастильні матеріали, вибухівка.



Рис. 2.2. Ділянки поля на околицях с. Клинове Донецької області постраждали від пожежі (дані: Maxar Technologies)

На рисунку 2.2, в межах околиць с. Клинове, пожежі несуть негативний вплив на родючість ґрунту даного поля. Наслідком є зменшення властивостей утримання вологи у землі та збільшення ерозійної небезпеки. Рослинність, яка укріплювала ґрунт, втрачається і це призводить до підвищення втрати верхнього шару ґрунту в результаті вимивання дощами. Також, пожежі несуть підвищення температури ґрунту, що впливає на мікроорганізми, які відіграють важливу роль у процесах, такі як розклад органічних решток та азотфіксація [39].



Рис. 2.3. Викопані окопи (дані: Maxar Technologies)

Рисунок 2.4 демонструє сліди від важкої техніки, які наносять шкоду тим, що ущільнюють ґрунт в місцях свого руху. При частому використанні одних і тих самих доріг утворюється глибока колія, яка в сезон дощів може перерости в яр.

Отже, обрана досліджувана територія, а саме Бахмутський район у Донецькій області, багатий на природні ресурси та з розвиненою інфраструктурою. Але через воєнні дії, які почали у 2014 році та посилюються у 2022 році, зазнав значних руйнувань. Через це сільськогосподарські підприємства припинили свою активну діяльність, адже, ґрунти забруднені та деградовані. Великі площі сільськогосподарських угідь зазнали пошкоджень вирвами від снарядів, пожежами, оборонними спорудами та слідами руху важкої техніки.



Рис. 2.4. Сліди від важкої техніки (дані: Maxar Technologies)

## 2.2. Гіперспектральні технології та їх можливості і для моніторингу порушень

Гіперспектральна технологія поєднує традиційну зйомку та спектроскопію для одночасного отримання просторової та спектральної інформації від об'єкта. Вперше описана А. Ф. Гетцем та іншими науковцями у їх роботі [43], ця технологія використовується для безпосередньої ідентифікації матеріалів поверхні за знімками.

Гіперспектральне дистанційне зондування має значні переваги перед мультиспектральною зйомкою [44] і все більше використовується в різних сферах, таких як сільське господарство. Наприклад, гіперспектральні знімки стали ефективним інструментом для аналізу стану фруктів і овочів завдяки розвитку оптичних датчиків та технік візуалізації. Цей підхід дає можливість

фіксувати спектральні дані для кожного пікселя сцени, що допомагає визначати різні речовини або процеси [45].

Гіперспектральне зображення зазвичай поєднує спектроскопічні методи з 2D-геометричним простором і одновимірним-спектральним виявленням деталей, забезпечуючи високу спектральну роздільну здатність. Дана технологія широко досліджена та весь час вдосконалюється, що призвело до багатьох ефективних застосувань у сільському господарстві, де вона використовується для оцінки якості продукції шляхом створення просторових карт на основі спектральних даних. У точному землеробстві гіперспектральне зображення має практичне застосування для оцінки стану здоров'я культур на різних стадіях росту за їх специфічними ознаками. Це дозволяє класифікувати різноманітні матеріали або досліджувати певні композиційні властивості біологічних суб'єктів.

Найпоширенішим комерційним програмним забезпеченням для гіперспектральних зображень є *ENVI*, *ERDAS*, *MATLAB* і *Unscrambler*.

Для дослідження можливостей гіперспектрального зондування було використано знімки з супутника *PRISMA*. Він оснащений двома датчиками:

- **модуль HYS** (гіперспектральна камера). Датчик HYS являє собою спектрометр для двох діапазонів, *VIS/NIR* (видимий/ближній інфрачервоний) та *NIR/SWIR* (ближній/короткохвильовий інфрачервоний), з загальною кількістю 234 каналів в обох діапазонах. Основною метою місії є гіперспектральне зображення суші, рослинності, внутрішніх вод і прибережних зон з високою просторовою та спектральною здатністю [46].
- **модуль PAN** (панхроматична камера). Сенсорний модуль *PAN* є оптичним сканером високої роздільної здатності, який синхронізований з даними *HYS* для тестування методів об'єднання зображень [47].

Модуль *HYS* має просторову роздільну здатність 30 м і працює в двох діапазонах: 66-канальний діапазон *VIS/NIR* зі спектральним інтервалом 400-1010 нм і 171-канальний діапазон *NIR/SWIR* зі спектральним інтервалом 920-2505 нм.

Він використовує техніку сканування *pushbroom* з шириною смуги сканування 30 км та полем огляду 1000 км з обох сторін.

Модуль *PAN* також використовує техніку сканування *pushbroom* з ідентичною шириною смуги та полем огляду, але з просторовою роздільною здатністю 5 м. *PRISMA* знаходиться на сонячно-синхронній орбіті на висоті 614 км [46].

Продукти супутника *PRISMA*, мають різні класи в залежності від ступеня обробки:

- **Рівень 0** - включає необроблені двійкові дані, такі як допоміжні дані приладів і супутників (наприклад, відсоток хмарності).
- **Рівень 1** - включає радіометрично і геометрично відкалібровані гіперкуби і зображення панхроматичного випромінювання у верхніх шарах атмосфери.
- **Рівень 2** - поділяється на *L2A*, *L2B*, *L2C* і *L2D*, які надають геоприв'язану наземну радіацію (*L2B*), відбивну здатність (*L2C*), а також геоприв'язані та геокодовані зображення відбивної здатності (*L2D*) [48].

Продукти рівня 1 забезпечують картографування земного покриву і маскування хмар, враховуючи такі атмосферні складові, як аерозолі, тонку оптичну товщину хмар і водяну пару. Детальні технічні характеристики продуктів *PRISMA* можна знайти в документі «Технічні характеристики *PRISMA*». Рівні 1 і 2 генеруються за запитом у форматі *HDF5*. Продукти рівня 2 можуть бути прив'язані до місцевості з наземними контрольними пунктами (НКП) або без них, залежно від потреб користувача та наявності НКП [49].

Після запуску супутника *PRISMA* у червні 2019 року гіперспектральні дані стали загальнодоступними. Так як такі матеріали є цінними для різних застосувань, вони привертають значний інтерес з боку фахівців дистанційного зондування. Починаючи з 2019 року, ці дані використовуються в численних програмах. Наприклад, програмне забезпечення *Environment for Visualizing Images (ENVI)*, яке включає інструментарій *ENVI-PRISMA*, полегшує обробку гіперспектральних знімків *PRISMA*. А для зручної обробки цих даних в програмі

*ERDAS*, було створено окремий плагін, який конвертує файли формату *HDF5* в *tiff*. Крім того, було розроблено програмне забезпечення *ImaACor* для атмосферної корекції, як мультиспектральних, так і гіперспектральних зображень. Оцінки з використанням даних *PRISMA* демонструють її цінність для обробки даних *L1* і виконання атмосферної корекції.

Загальні кроки попередньої обробки зображень *PRISMA* включають географічну прив'язку, її корекцію, видалення зашумлених ліній і смуг (що впливають на понад 20% смуг), перетворення яскравості в коефіцієнт відбиття для продуктів *L1* і *L2B*, а також маскуванню непотрібних пікселів за допомогою карти земного покриву *PRISMA L1*.

Супутник *PRISMA* забезпечує глобальне покриття зі спектральною роздільною здатністю до 12 нм, спектральними діапазонами понад 230 нм і просторовою роздільною здатністю 30 м [50; 51]. *PRISMA* надає більше інформації про земну поверхню, ніж запланований гіперспектральний сенсор *HYPISIRI* (запуск якого заплановано на 2024 рік) і більш ранній гіперспектральний сенсор *AVIRIS* [52].

Канали *VIS-SWIR* супутника *PRISMA* в поєднанні з панхроматичною камерою пропонують високий потенціал для дослідження якості води, кращу роздільну здатність у каналі *SWIR* порівняно з *Sentinel-2* та покращений аналіз рослинного покриву [53, 54]. Його спектри відбиття 400-2500 нм корисні для ідентифікації типів палива, водних систем, сільськогосподарських угідь і лісового покриву, забезпечуючи кращу ідентифікацію хвойних чи широколистяних дерев [55].

Датчик *PRISMA*, що поєднує в собі гіперспектральний сенсор і панхроматичну камеру середньої роздільної здатності, включає в себе симулятор гіперспектрального зображення (*HSIS*) для оцінки продуктивності процесорів. Стандартні продукти *L1* і *L2* підходять для отримання біофізичних параметрів, а *L2D* ефективний для дослідження вигорілих територій [56].

Супутник *PRISMA* є унікальним космічним джерелом гіперспектральних даних для вивчення та аналізу геофізичних та геологічних явищ. Дані *PRISMA* можуть ефективно допомогти визначити неорганічний та органічний вмісту ґрунту [57], а також у виявленні та дослідженні природного і антропогенного впливу на рослинність, що робить їх ефективним інструментом для вивчення цієї галузі [58]. У майбутньому планується додати алгоритми для більш ефективної класифікації характеристик рослинності за даними операційних космічних сенсорів [59]. Коефіцієнт *Coeff* (одновимірною квадратичною функцією довжини хвилі), обчислений за середніми спектрами *PRISMA* для кожної земельної ділянки, є важливим індексом для отримання точних результатів об'єктно-орієнтованої класифікації окремих ділянок сільськогосподарських культур. Головною перевагою об'єктно-орієнтованої класифікації над класифікацією по пікселях є швидкість та ефективність обчислення [60]. Комбіновані гіперспектральні та панхроматичні продукти дозволяють розпізнавати геометричні особливості, що забезпечують детальною інформацією про хімічний склад речовин на поверхні Землі [61].

*PRISMA* має кращу спектральну роздільну здатність і більш складну номенклатурну систему порівняно з *Sentinel-2*, але їх можна комбінувати для вивчення різних особливостей об'єктів, таких як: фізико-хімічні і геометричні особливості об'єктів. Це сприяє ефективнішому аналізу лісів, точному землеробству, дослідженням якості води та змін клімату [62]. Автоматичні процеси можуть бути використані для розробки карт палива різних частин Європи [63]. Дані *PRISMA* можуть бути об'єднані з даними панхроматичної камери або супутниковими даними *Landsat* і *ASTER* (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection*) [64].

### 2.3. Методика гіперспектрального аналізу обраних ділянок

Для обробки отриманих матеріалів автор використовував програмне забезпечення *ERDAS IMAGINE* - це растровий програмний пакет, розроблений спеціально для отримання інформації із зображень (Рис. 2.5). Дана програма містить повний набір інструментів для створення точних базових зображень для включення в базу геоданих ГІС та *ESRI*. Тут доступні інструменти, такі як ортотрансформація зображення, мозаїка, репроекція, класифікація та інтерпретація, які дозволяють користувачеві аналізувати дані зображення та представляти їх у форматах, починаючи від друкованих карт і закінчуючи 3D-моделями [21].

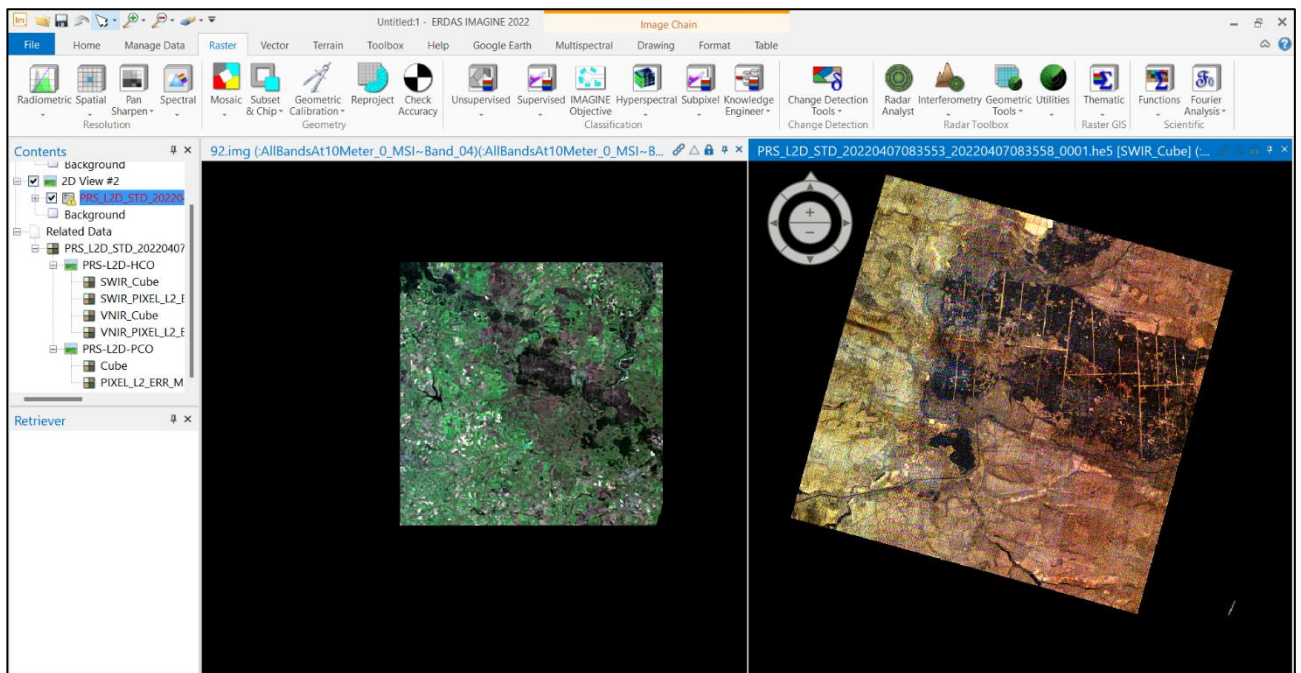
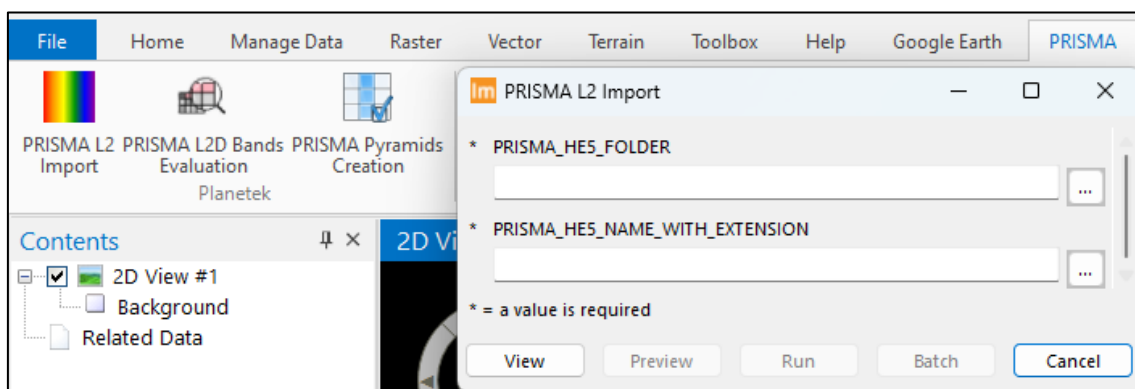


Рис. 2.5. *ERDAS IMAGINE*

Для гіперспектрального аналізу використовувалися знімки з супутнику *PRISMA*, який обладнаний двома датчиками: модулем *HYS* (гіперспектральна камера) і модулем *PAN* (панхроматична камера).

Першим кроком було встановлення спеціального плагіну для роботи з даними супутнику *PRISMA* в програмному забезпеченні *ERDAS IMAGINE*. Він дає можливість імпортувати (Рис. 2.6, А) дані в програму за допомогою інструменту *PRISMA L2 Import*. Виконавши цю дію, він додає в програму вже інтерпретовані

знімки, зробивши з одного файлу формату *he5* (Рис. 2.6, Б) чотири файли формату *tiff* (Рис. 2.6, В). Зміна кількості відбувається через те, що формат *tiff* не може коректно представити всі дані, які містяться у вихідному знімку, тому він виділяє різні файли, а саме: панхроматичний *PAN*, видимий ближній інфрачервоний *VNIR*, короткохвильовий інфрачервоний *SWIR* та комбінацію двох останніх *VNIR+SWIR*. Кожен з них можна окремо завантажувати та обробляти не залучаючи інші, що позитивно впливає на швидкість та ефективність обробки.



А

| Ім'я   | Дата змінення   | Тип      | Розмір       |
|--|-----------------|----------|--------------|
| PRS_L2D_STD_20220824083241_20220824083245_0001.he5 | 26.05.2024 0:13 | Файл HE5 | 2 122 425 КБ |

Б

|  |                  |           |              |
|--|------------------|-----------|--------------|
| PRS_L2D_STD_20220824083241_20220824083245_0001_PAN.tiff            | 19.05.2024 21:47 | Файл TIFF | 106 806 КБ   |
| PRS_L2D_STD_20220824083241_20220824083245_0001_refl_VNIR_SWIR.tiff | 19.05.2024 21:49 | Файл TIFF | 1 387 364 КБ |
| PRS_L2D_STD_20220824083241_20220824083245_0001_SWIR.tiff           | 19.05.2024 21:47 | Файл TIFF | 512 864 КБ   |
| PRS_L2D_STD_20220824083241_20220824083245_0001_VNIR.tiff           | 19.05.2024 21:47 | Файл TIFF | 195 672 КБ   |

В

Рис. 2.6. Візуалізація застосування плагіна (А-інструмент *PRISMA L2 Import*; Б-вихідний знімок супутника *PRISMA* формату *he5*; В-результат виконання інструменту *PRISMA L2 Import*, 4 різних знімка формату *tiff*)

Для покращення спектральної роздільної здатності треба виконати фільтрацію шумів. Вони утворюються в наслідок того, що гіперспектральний сканер захоплює велику кількість спектральних каналів і деякі з них фіксують

сигнали, які спотворюють знімок. Для їх усунення використовується інструмент *Convolution*. Принцип його роботи полягає в підрахунку середніх значень для центрального пікселя в полі 3 на 3 (Рис. 2.7).

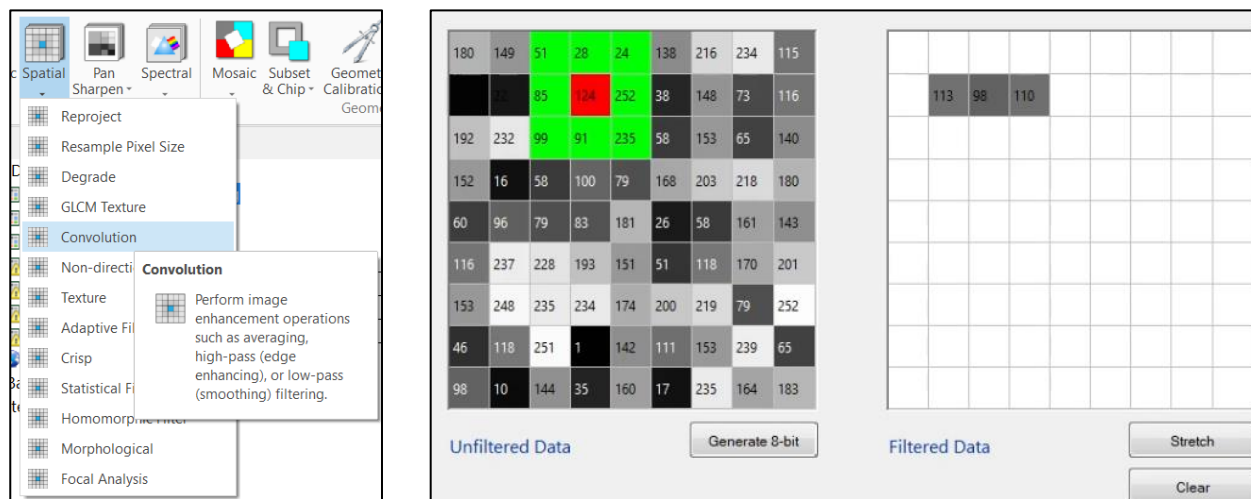


Рис. 2.7. Візуалізація інструменту *Convolution*

Алгоритм працює таким чином, що після підрахунків, залишкові сигнали, які є шумами відфільтровуються, тим самим покращуючи спектральну роздільну здатність, але погіршуючи просторову (Рис. 2.8). В результаті на зображенні зліва бачимо не відфільтроване більш чітке зображення, але з різкими артефактами. Ці артефакти і є шумами, які зменшують коректність гіперспектрального аналізу. Зображення справа відфільтроване, без «цяток» і має меншу чіткість.



Рис. 2.8. Результат використання інструменту *Convolution*

З метою оптимізації процесу аналізу та зменшення навантаження на технічне забезпечення, автор виконав обрізку супутникових знімків, залишивши лише ділянки, які мають значні досліджувані пошкодження. Для цього було використано інструмент *Subset* (Рис. 2.9).

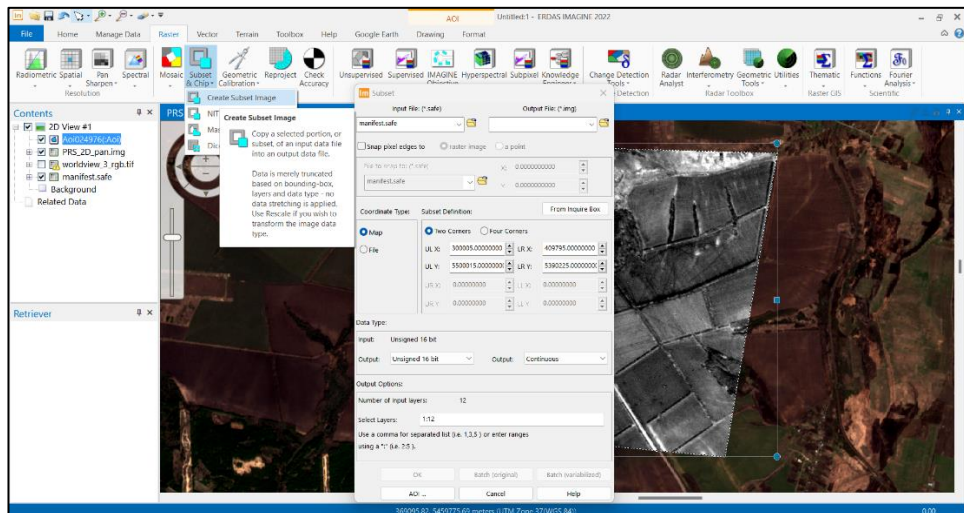


Рис. 2.9. Візуалізація інструменту *Subset*

В ході виконання обрізки було додано шар *AOI* яким було окреслено область інтересу. Саме по цьому шару було обрізано всі матеріали, що були відібрані для обробки (Рис. 2.10).



Рис. 2.10. Результат використання інструменту *Subset*

Для покращення роздільної здатності знімків з супутника *PRISMA*, автор виконав *Pan Sharpen* обравши метод *HPF Resolution Merge* (Рис. 2.11). Саме він найкраще підходить для обробки гіперспектральних знімків.

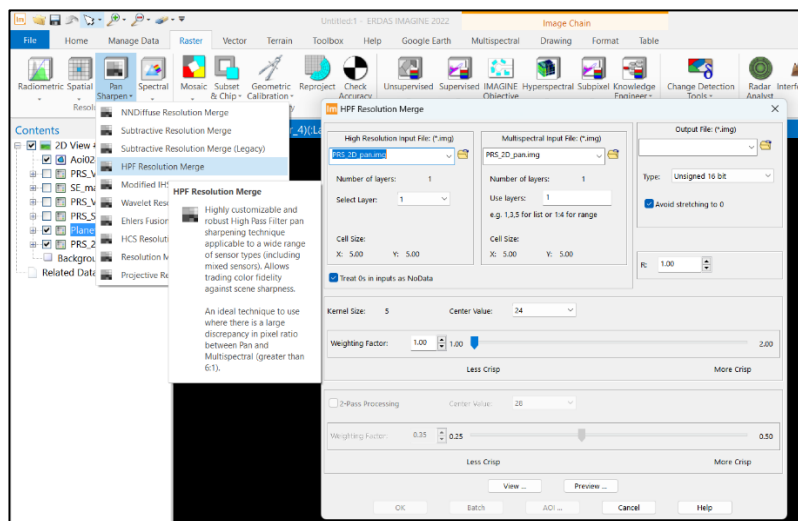


Рис. 2.11. Візуалізація методу *HPF Resolution Merge*

Результат покращення роздільної здатності можна побачити справа на рисунку 2.12. Зображення кращої роздільної здатності забезпечують точніший і ефективніший геопросторовий аналіз. Вони дають більш детальну та чітку інформацію про поверхню території дослідження. Це може мати вирішальне значення для практичного застосування. У такому випадку чим краще роздільна здатність, тим більше пошкоджень можна ідентифікувати та проаналізувати.

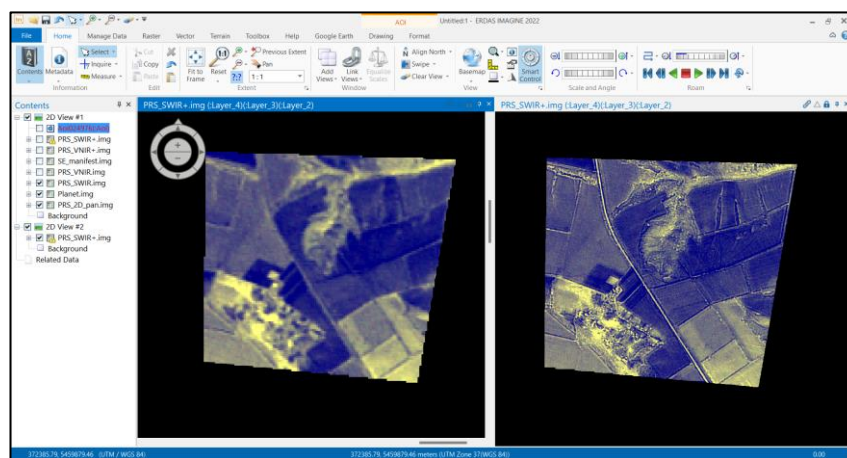
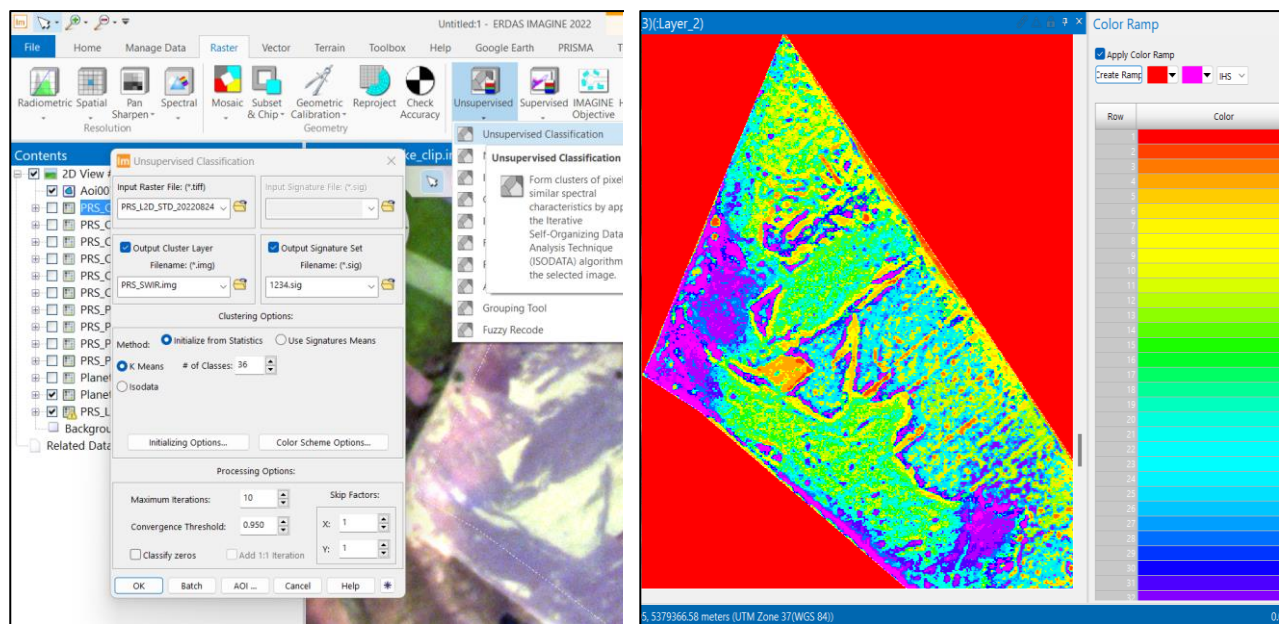


Рис. 2.12. Результат покращення роздільної здатності супутникових знімків

*PRISMA*

Стан території було візуалізовано за допомогою некерованої класифікації. Для використання даної операції було використано вбудований інструмент *Unsupervised Classification* за методом *K-середніх* (Рис. 2.13). Також при виконанні класифікацій разом з класифікованими знімками було збережено еталони сигнатур за якими відбулася класифікація. В подальшому дані еталони було використано для виділення гіперспектральних кривих, які відповідають типовим пошкодженням сільськогосподарських угідь на території дослідження.



А

Б

Рис. 2.13. А-Візуалізація інструменту *Unsupervised Classification*; Б-Результат інструменту *Unsupervised Classification*

В результаті було отримано знімки класифіковані на 36 класів і готові для обробки. Для кращого візуального сприйняття класифікації кількість класів була скорочена до 5 основних, шляхом об'єднання більш вузьких класів. Щоб візуальний аналіз був більш зручний, автор вручну виконав підбір кольорів для класів (рис 2.14).

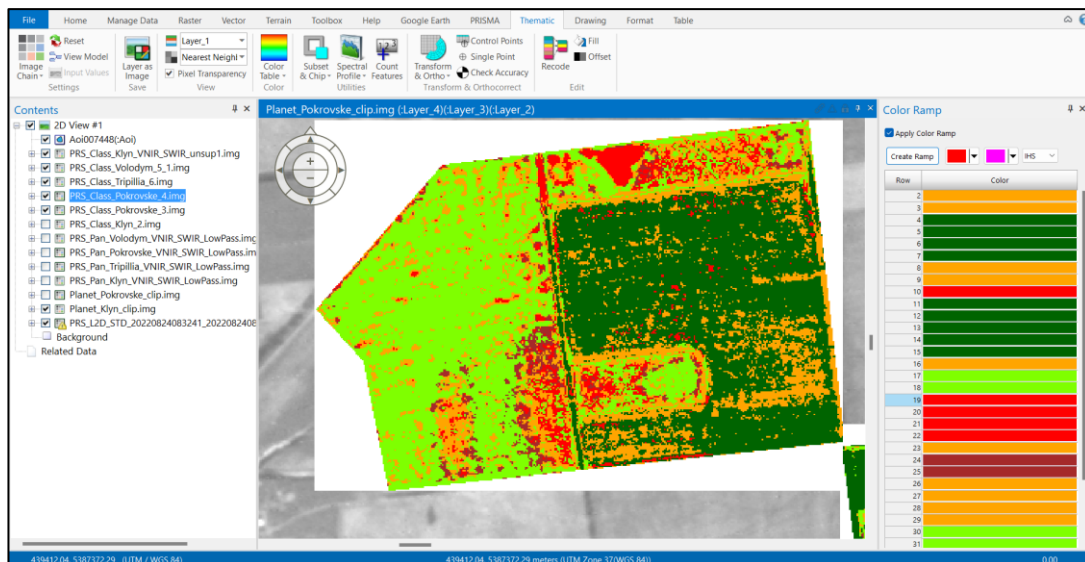


Рис. 2.14. Результат застосування *Unsupervised Classification* та підбору кольорів класів

В ході виконання вище перерахованих дій, автор отримав готові класифіковані матеріали, які дають можливість провести дослідження оброблених знімків.

Для наочного представлення отриманих результатів, дані було оформлено у вигляді карт за допомогою програми *ArcMap*, яка входить в сімейство програм *ArcGIS* (рис 2.15).

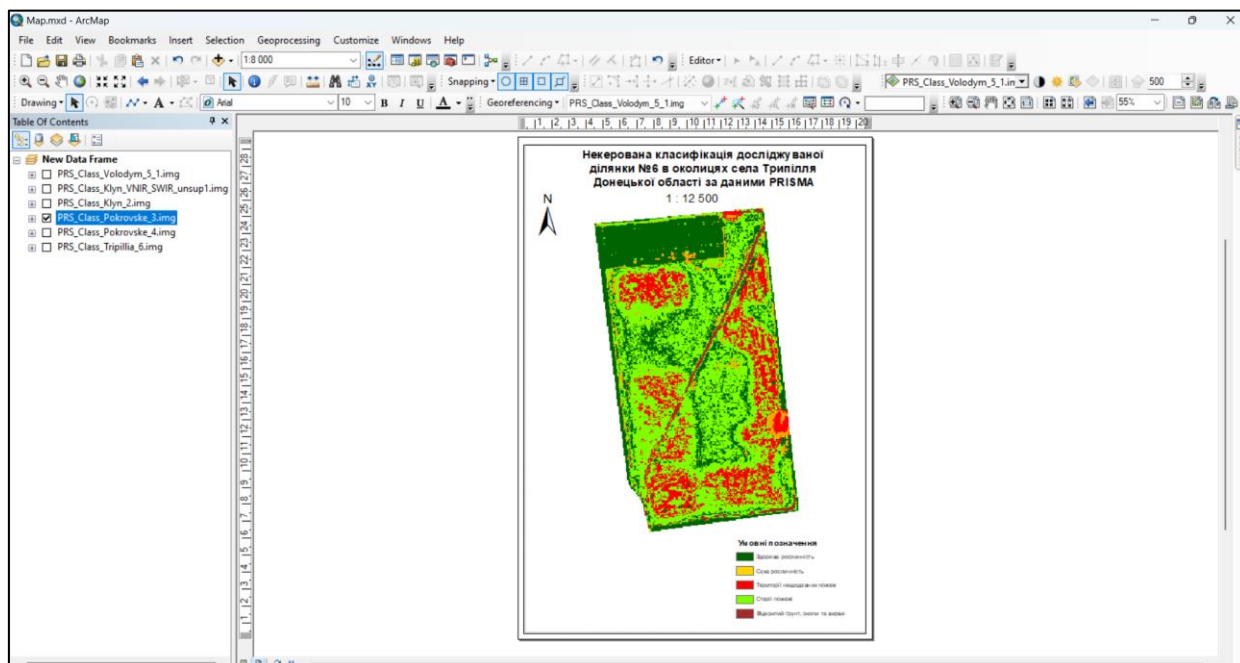


Рис. 2.15. Результат оформлення карт в *ArcMap*

Наступним кроком було виділення гіперспектральних кривих для створення профілів типових пошкоджень сільськогосподарських угідь. Ця інформація записувалась при створенні еталонних сигнатур на етапі некерованої класифікації знімків. За допомогою інструмента *Signature Editor* (Рис. 2.16), можна працювати з раніше створеними класами. Дане створення гіперспектральних профілей дасть змогу в майбутньому одразу застосувати потрібні налаштування для пошуку досліджених порушень.

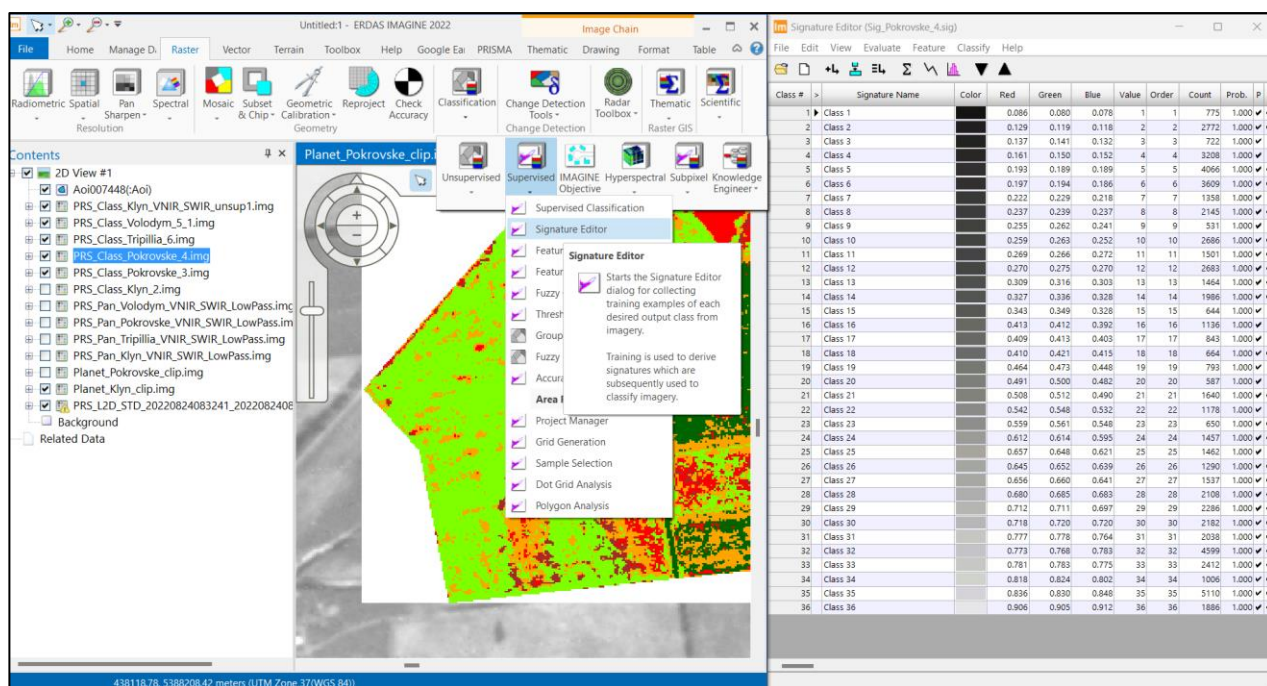


Рис. 2.16. Візуалізація інструменту *Signature Editor*

В ході застосування даного інструменту та його функціоналу, автор отримав гіперспектральні профілі типових порушень сільськогосподарських угідь в межах обраних територій. Даний профіль побудувався для всіх 234 каналів, які фіксує супутник *PRISMA* (Рис. 2.17).

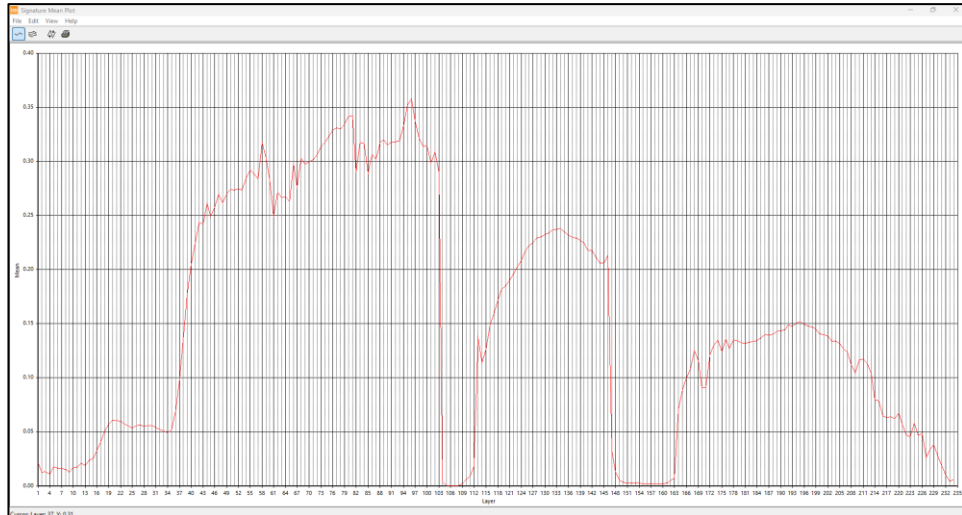


Рис. 2.17. Гіперспектральний профіль пошкоджень внаслідок пожежі

Наступним етапом роботи була оцінка пошкоджень досліджуваних ділянок. Для цього класифіковані растри векторизовано, тобто переведено з піксельного зображення в лінійне. Дана операція була виконана за допомогою інструменту *Raster to Shapefile* (Рис. 2.18). В ході його використання, береться растровий файл будь-якого формату, у цьому контексті це *.img* та конвертується в *.shp*. *.shp* - спеціальний формат векторних файлів, перевагою якого є те, що він підтримується багатьма ГІС-платформами. В результаті отримуємо векторний файл (Рис. 2.19), де кожен полігон відповідає певному класу, де їх можна розділити за типами пошкоджень і підрахувати площі вцілілих і пошкоджених ділянок.

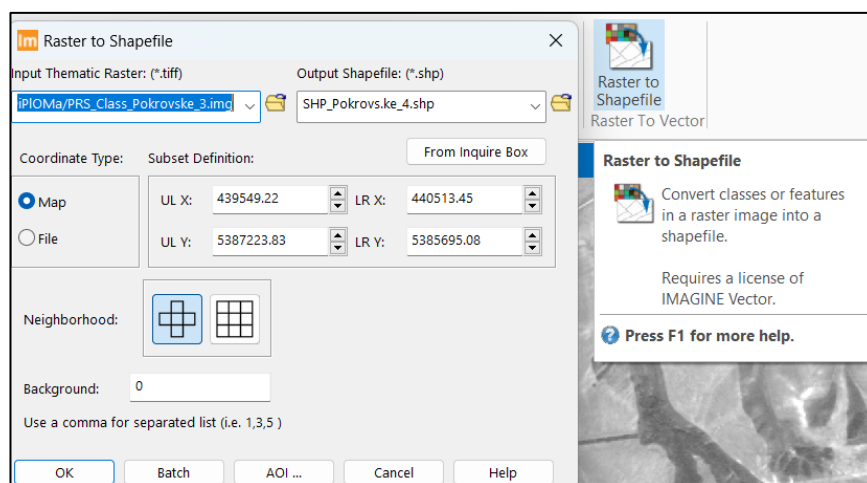


Рис. 2.18. Візуалізація інструменту *Raster to Shapefile*

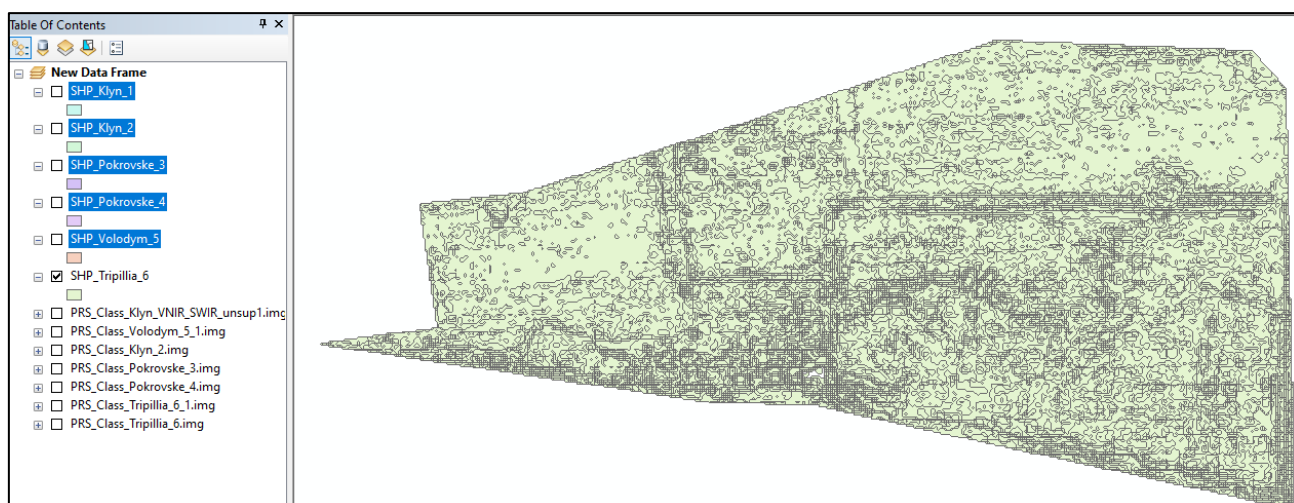
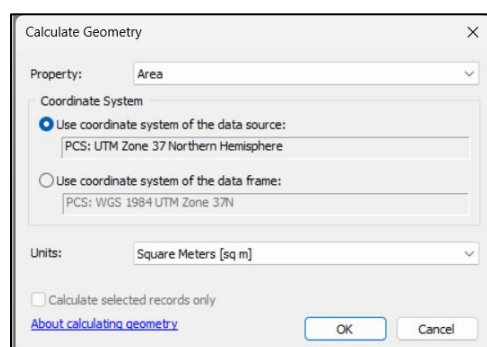


Рис. 2.19. Результат використання інструменту *Raster to Shapefile*

Для підрахунку площ пошкоджених та цілих ділянок, різні типи класів було виділено в спільні полігони, таким чином автор отримав 5 полігонів, кожен з яких відповідає класу виділеному раніше. За допомогою інструменту *Calculate Geometry* було пораховану площу кожного класу (Рис. 2.20, А та Б).



А

| Class dama                      | Score   |
|---------------------------------|---------|
| Здорова рослинність             | 77615   |
| Території нещодавніх пожеж      | 106365  |
| Відкритий ґрунт, вирви та окопи | 72879   |
| Суха рослинність                | 1329731 |
| Старі пожежі                    | 1070841 |

Б

Рис. 2.20. А - Візуалізація інструменту *Calculate Geometry*; Б - Результат використання інструменту *Calculate Geometry*

У якості досліджуваної території автор обрав сільськогосподарські угіддя, що знаходяться в околицях сіл: Володимирівка, Клинове, Покровське, Трипілля Бахмутського району Донецької області. Було взято 6 ділянок, на яких зображено поля з різними яскраво вираженими пошкодженнями (Рис. 2.21).



Рис. 2.21. Супутникові знімки досліджуваної території

Обрання невеликих ділянок викликано технічною необхідністю, адже великий масив пікселів є складним для програмної обробки.

Отже, описана методика гіперспектрального аналізу виступає актуальним та ефективним інструментом для моніторингу та оцінки стану сільськогосподарських земель, які було пошкоджено внаслідок бойових дій, що має важливе значення для відновлення та оптимізації використання даних угідь.

## 2.4. Підсумки загальних рис порушень території і переваг гіперспектрального аналізу

Аналіз території показав, що внаслідок бойових дій у Бахмутському районі Донецької області ґрунти зазнають всіх чотирьох основних видів пошкоджень:

- **механічні**, які включають зміни структури ґрунту через риття окопів, траншей та ущільнення під дією військової техніки, що впливає на втрату родючості та погіршення утримання вологи;
- **фізичні порушення** відбуваються через рух техніки та вибухів, внаслідок чого змінюється температурний режим і вологозабезпеченість;
- **хімічні порушення** викликані забрудненням від палива, продуктів горіння та токсинів, що спричиняють деградацію, ерозію та зміни клімату;
- **біологічні** включають загибель мікроорганізмів у ґрунті через механічні та хімічні впливи, знижуючи родючість.

Дані пошкодження створюють довгостроковий негативний вплив на сільськогосподарські землі.

Гіперспектральна технологія поєднує традиційну зйомку з методами спектроскопії, що дає суттєві переваги для моніторингу та аналізу пошкоджень території. Ця технологія дає можливість отримувати зображення, які містять велику кількість спектральних діапазонів, які дозволяють чітко визначати різноманітні матеріали та речовини. Гіперспектральні зображення мають високу роздільну здатність, що дозволяє детально розглядати навіть незначні пошкодження на місцевості.

Гіперспектральні дані ефективно використовуються для оцінки стану сільськогосподарських угідь, здоров'я рослин, дослідження якості води та природних ресурсів. Можливість поєднання гіперспектральних даних з іншими типами зображень, такими як панхроматичні, підвищує точність проведення аналізів та класифікацій об'єктів. Спеціалізоване програмне забезпечення, що призначено для обробки даних дистанційного зондування, таке як, *ERDAS*

*IMAGINE*, дозволяє виконувати безліч операцій обробки супутникових знімків, в тому числі і атмосферну корекцію, яка покращує точність отриманих даних.

*ENVI*, *ERDAS* та *MATLAB* – це передові програмні продукти, які дають можливість швидко і ефективно обробляти та аналізувати великі обсяги даних. Це дозволяє проводити детальний геопросторовий аналіз, ідентифікуючи та оцінюючи різні типи пошкоджень території, забезпечуючи точну та надійну інформацію для прийняття рішень щодо відновлення та управління земельними ресурсами.

Таке програмне забезпечення дає змогу здійснювати ретельний геопросторовий аналіз, ідентифікуючи та оцінюючи різні типи пошкоджень території. Воно надає точні та достовірні дані, для розробки ефективних стратегій відновлення та управління земельними ресурсами.

## РОЗДІЛ 3. ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОРУШЕНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ НА ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 3.1. Виявлення і оцінка пошкоджень на території дослідження за обраною методикою

За розробленою методикою, автором була проведена візуалізація пошкоджень сільськогосподарських угідь. В результаті було отримано 6 класифікованих зображень. Вони показують розподіл пошкоджених та вцілілих ділянок на досліджуваних територіях в околицях згаданих сіл Донецької області.

На класифікованому зображенні ділянки №1 поблизу села Клинове (Рис. 3.1) у центральній частині присутня здорова рослинність, представлена зеленим кольором (тут і надалі – використовується власна уніфікована кольорова схема) і оточена помаранчевим, що позначає суху рослинність. Бачимо розосереджені червоні ділянки, яким відповідають території нещодавніх пожеж. Старі пожежі, позначені салатовим кольором і займають значну частину зображення. Відкритий ґрунт, окопи та вирви, зображені коричневим кольором, зосереджені переважно в північній частині класифікованого знімку. Чіткі коричневі точки відповідають вирвам від снарядів, а червоні ділянки навколо них зображують рослинність вигорілу в наслідок їх вибуху.

На зображенні ділянки №2 поблизу села Клинове (Рис. 3.2) здорова рослинність позначена зеленим кольором і займає значну частину зображення, особливо на півночі. Суха рослинність помаранчевого кольору розташована в центральній частині зображення. Нещодавні пожежі, позначені червоним кольором, переважають у південно-східній частині зображення, тоді як старі пожежі, позначені салатовим кольором, розосереджені по всій території. Відкритий ґрунт, окопи та вирви коричневого кольору розташовані в північно-східній частині зображення. Тут наявні великі ділянки відкритого ґрунту нетипових форм, що свідчить про їх природне походження в наслідок водної ерозії.

Зображення ділянки №3 поблизу села Покровське (Рис. 3.3) демонструє здорову рослинність зеленого кольору, яка займає велику частину зображення, особливо на півночі. Незначна суха рослинність помаранчевого кольору присутня в центральній частині зображення. Нещодавні пожежі, позначені червоним кольором, переважно розташовані на південному сході. Старі пожежі салатового кольору займають значні області в центральній частині зображення. Відкритий ґрунт, окопи та вирви коричневого кольору розташовані переважно в центрі. Чітка рівна лінія, що проходить по діагоналі зображення за своєю геометрією ідентифікується, як окоп.

На зображенні ділянки №4 (Рис. 3.4) поблизу села Покровське зелений колір позначає здорову рослинність, що присутня на значній частині зображення, особливо на сході. Суха рослинність помаранчевого кольору розосереджена по всьому зображенню. Червоні ділянки нещодавніх пожеж розташовані на півночі та півдні. Старі пожежі салатового кольору займають невеликі області. Відкритий ґрунт, окопи та вирви коричневого кольору розташовані вздовж південного краю зображення. Велика густина точкових ділянок відкритого ґрунту свідчить про високий рівень пошкоджень даної території саме в наслідок вибуху снарядів і утворення вирв.

Зображення ділянки №5 (Рис. 3.5) поблизу села Володимирівка демонструє високу щільність здорової рослинності, якій відповідає зелений колір в північно-східній частині знімку. Суха рослинність помаранчевого кольору в основному розташована на півдні та півночі. Червоні ділянки нещодавніх пожеж присутні на сході та заході зображення, тоді як старі пожежі салатового кольору займають дуже велику частину зображення і розосереджені всюди. Відкритий ґрунт, окопи та вирви коричневого кольору розташовані вздовж західної та південної меж зображення. Знову тонкі коричневі лінії свідчать про наявність окопів, а великі суцільні ділянки про активну водну ерозію.

На зображенні ділянки №6 (Рис. 3.6) поблизу села Трипілля зелений колір вказує на здорову рослинність, яка розташована переважно у верхньому правому

куті досліджуваної території. Помаранчевий колір відображає суху рослинність, яка розподілена нерівномірно по всьому зображенню. Червоні плями від нещодавніх пожеж, проявляються невеликими ділянками в різних частинах даної території. Салатовий колір, що вказує на старі пожежі, незначно розповсюджений в північно західній частині знімку. Коричневий колір позначає відкритий ґрунт, окопи та вирви, розташовані вздовж меж зображення, особливо на південній та східній сторонах. Лінійність відкритих ділянок ґрунту вказує на їх антропогенне походження, у вигляді окопів та значних оборонних споруд.

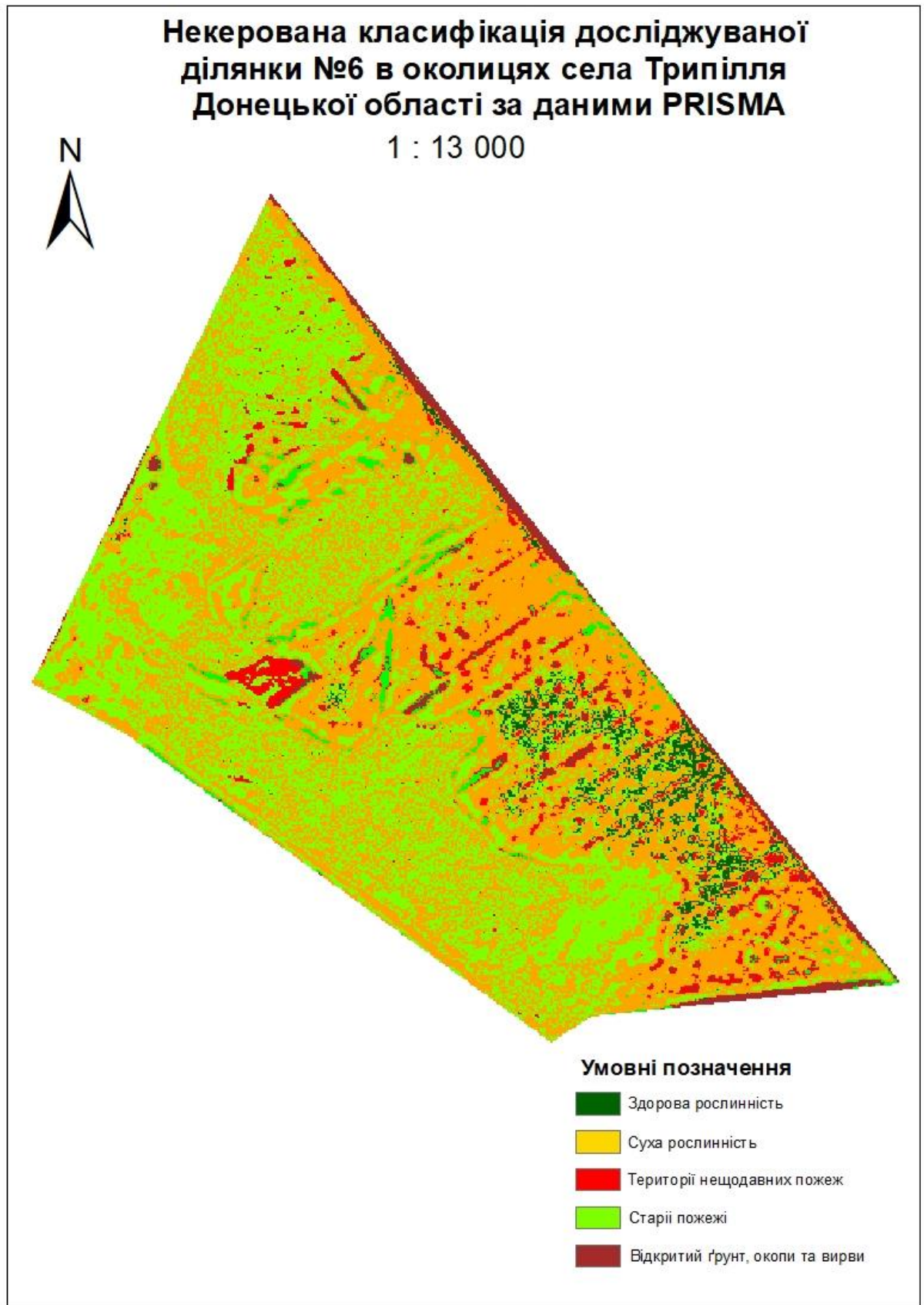


Рис. 3.1. Результат попіксельної спектральної класифікації пошкоджень на ділянці №1

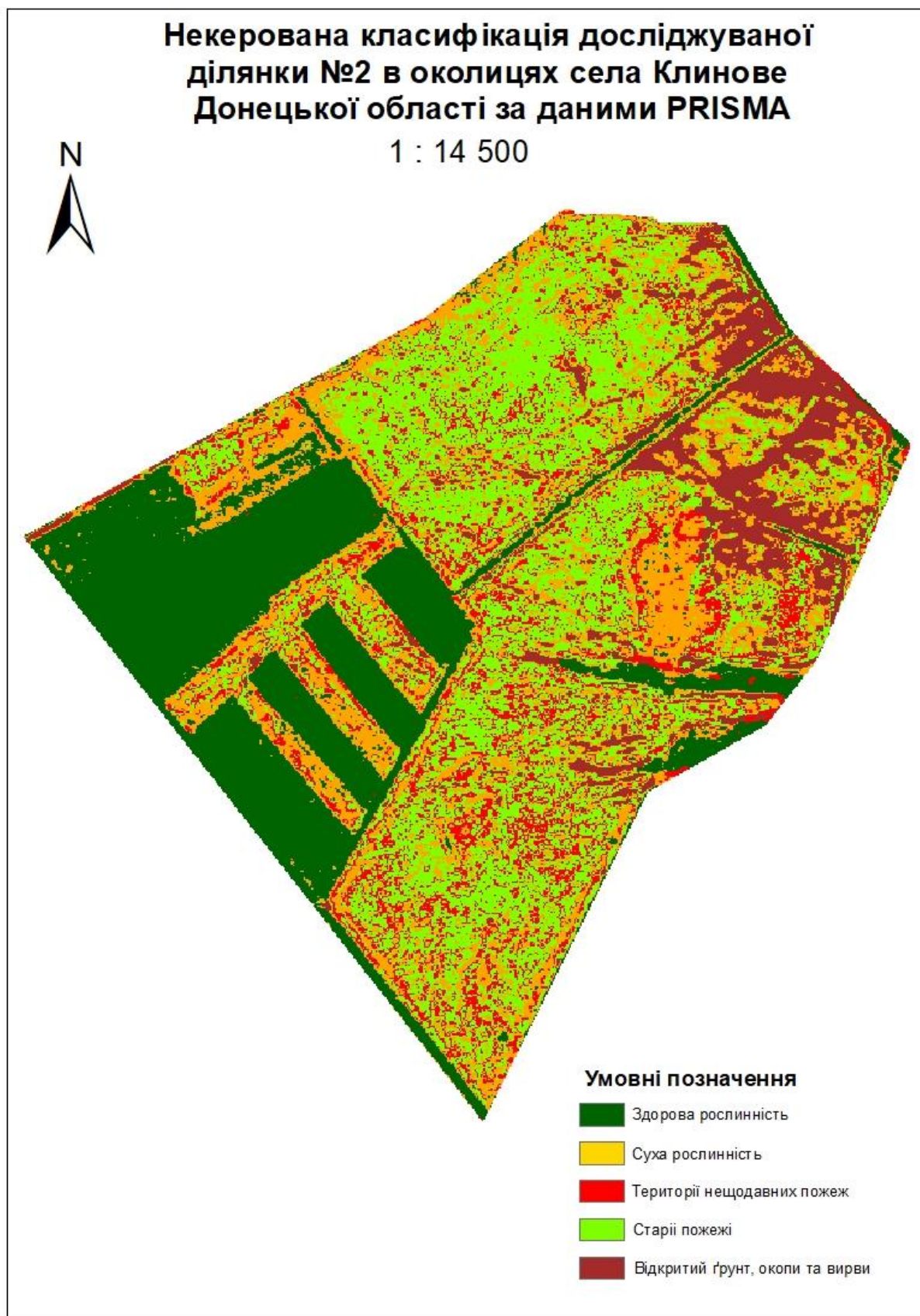


Рис. 3.2. Результат попікельної спектральної класифікації пошкоджень на ділянці №2

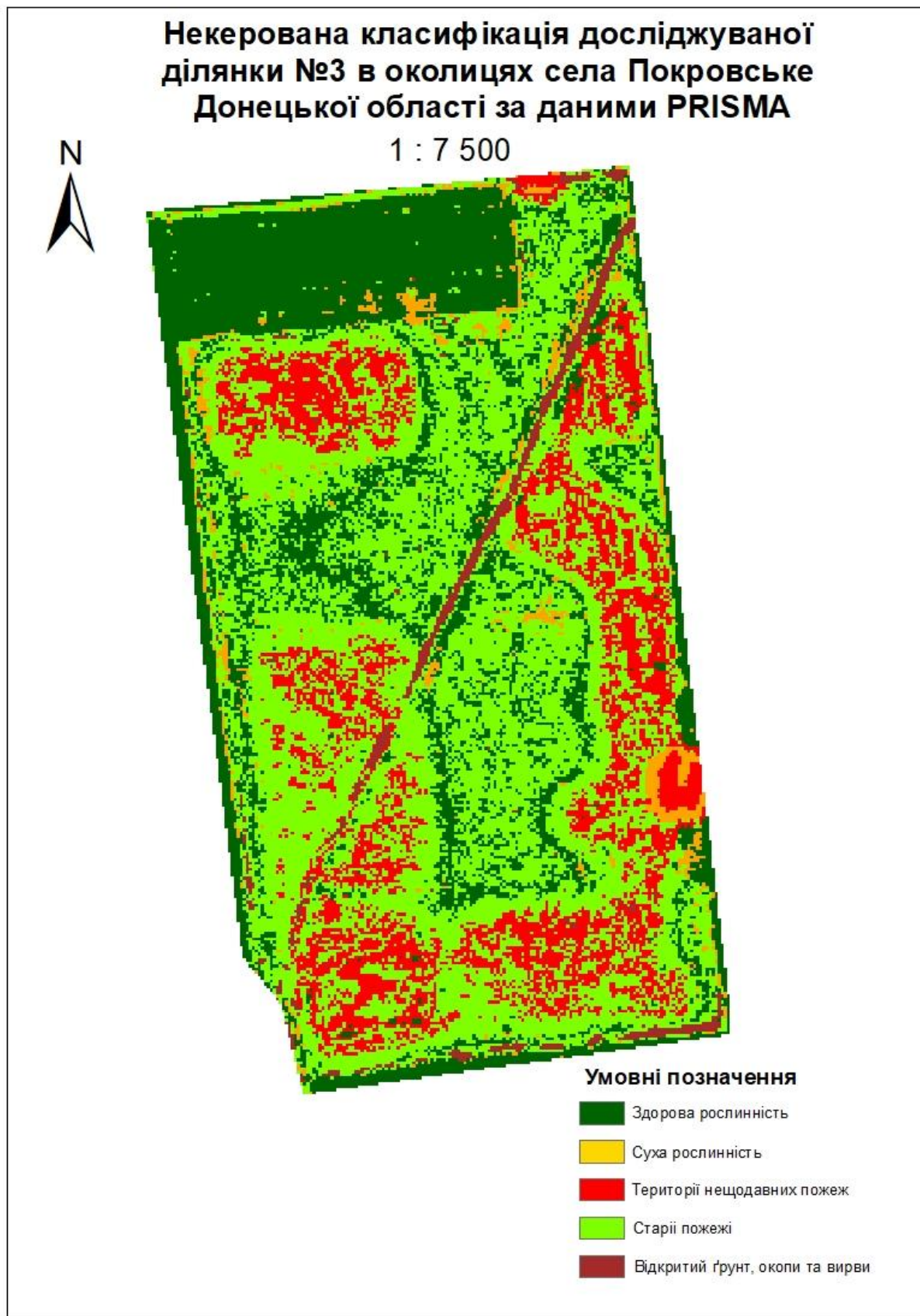


Рис. 3.3. Результат попіксельної спектральної класифікації пошкоджень на ділянці №3

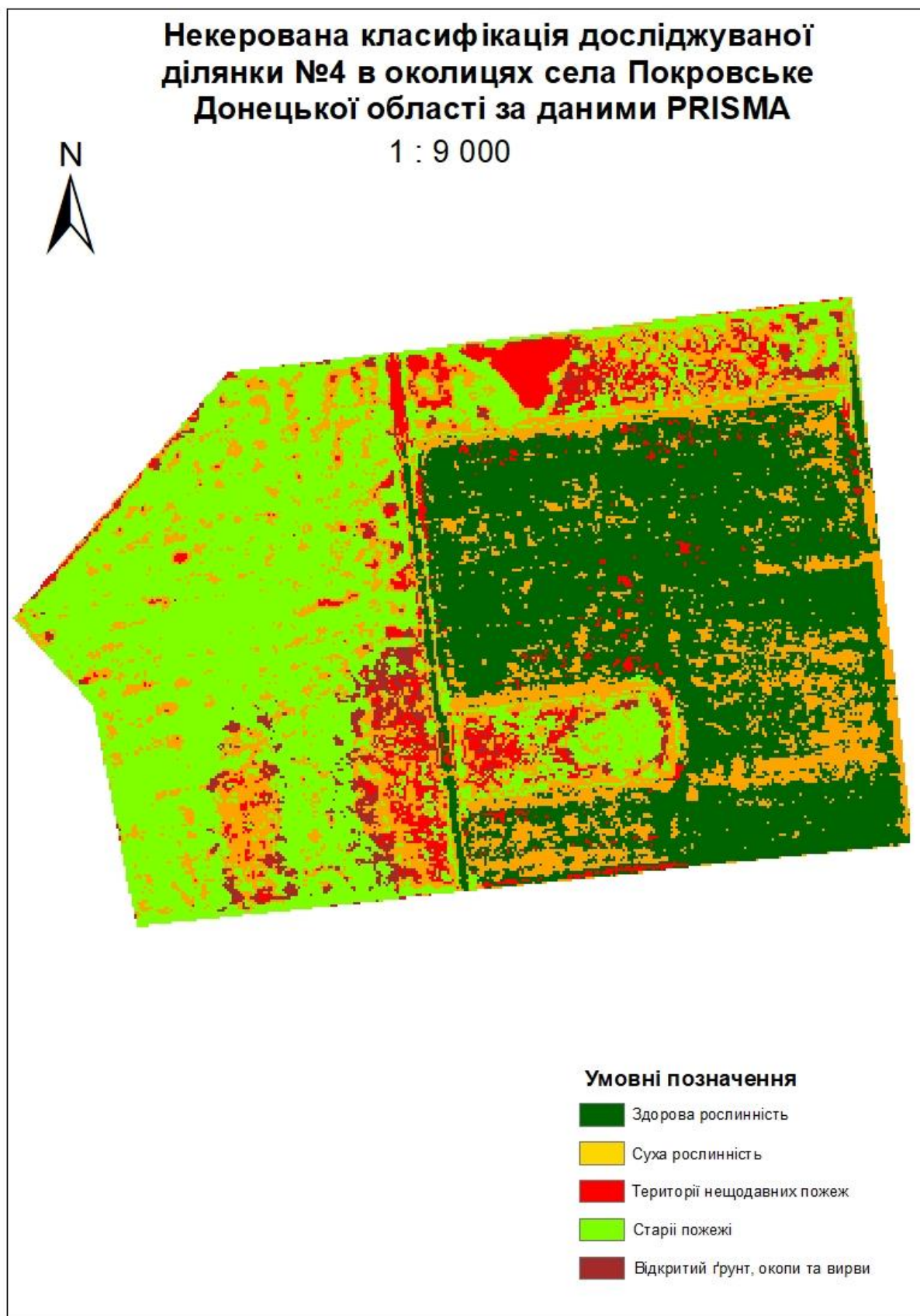


Рис. 3.4. Результат попіксельної спектральної класифікації пошкоджень на ділянці №4

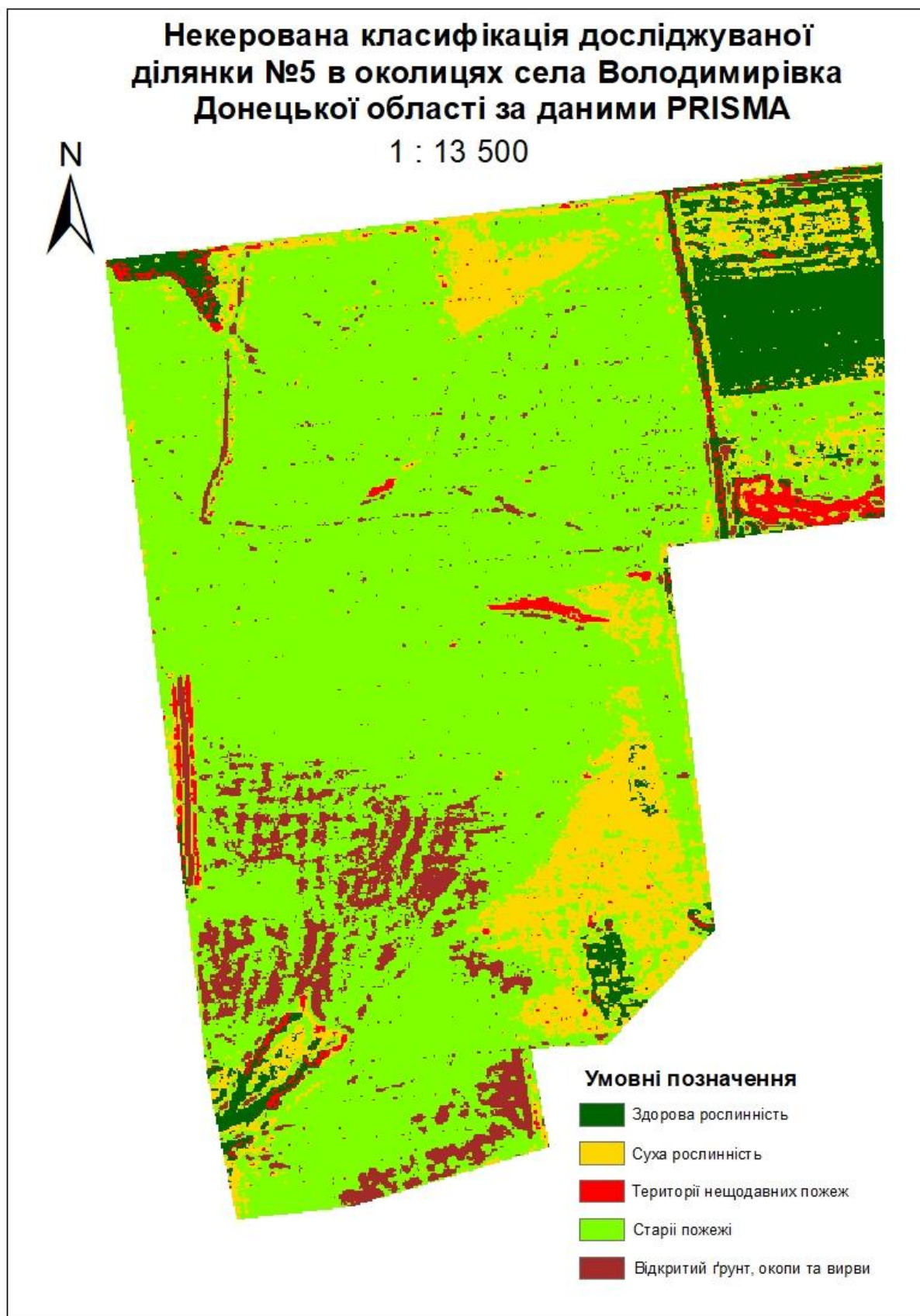


Рис. 3.5. Результат попіксельної спектральної класифікації пошкоджень на ділянці №5

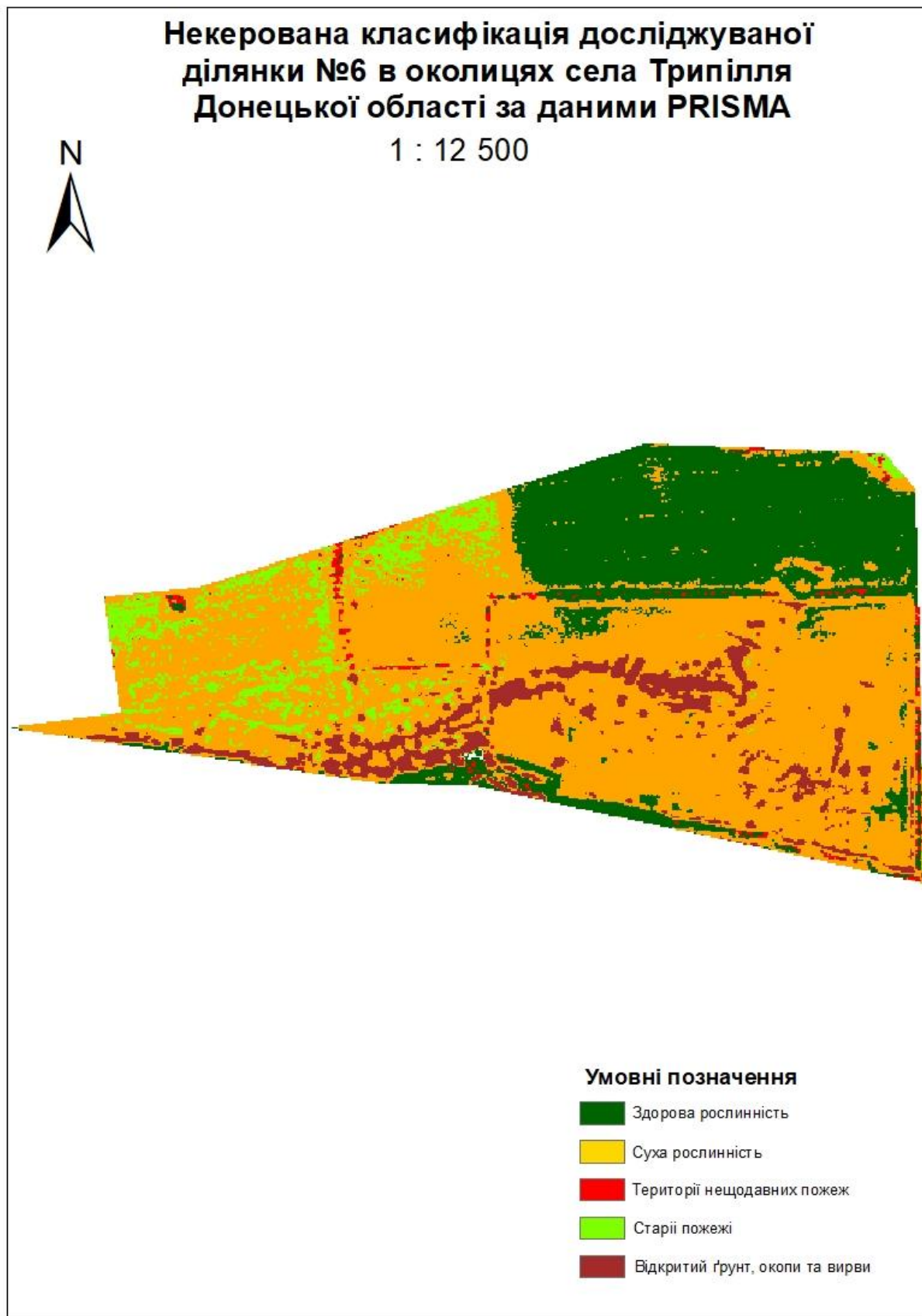


Рис. 3.6. Результат попікельної спектральної класифікації пошкоджень на ділянці №6

Наступним кроком автор проаналізував всі класи і виділив 3 основні типи пошкоджень: вирви, окопи та місця пожеж. Вони достатньо чітко ідентифікувалися на знімках з супутника PRISMA. Для цих типів пошкоджень було сформовано і зафіксовано гіперспекральні криві. Виділення таких кривих для кожного типу пошкоджень дає можливість в майбутньому для виявленні цих пошкоджень одразу застосовувати дані гіперспектральних кривих і чітко їх визначати. Для наочності також були сформовані таблиці в яких зазначено, яка довжина хвилі відповідає певному каналу. VNIR діапазон містить 66 каналів, охоплюючи довжини хвиль від 400 до 1010 нм, у свою чергу SWIR має 173 канали фіксуючи хвилі від 900 до 2500 нм.

Таблиця 3.1.

## Відповідність каналу до довжини хвилі VNIR діапазону

| Канал | Довжина хвилі | Канал | Довжина хвилі | Канал | Довжина хвилі | Канал | Довжина хвилі |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|
| 1     | 400           | 21    | 588           | 41    | 776           | 61    | 964           |
| 2     | 409,4         | 22    | 597,4         | 42    | 785,4         | 62    | 973,4         |
| 3     | 418,8         | 23    | 606,8         | 43    | 794,8         | 63    | 982,8         |
| 4     | 428,2         | 24    | 616,2         | 44    | 804,2         | 64    | 992,2         |
| 5     | 437,6         | 25    | 625,6         | 45    | 813,6         | 65    | 1001,6        |
| 6     | 447           | 26    | 635           | 46    | 823           | 66    | 1010          |
| 7     | 456,4         | 27    | 644,4         | 47    | 832,4         |       |               |
| 8     | 465,8         | 28    | 653,8         | 48    | 841,8         |       |               |
| 9     | 475,2         | 29    | 663,2         | 49    | 851,2         |       |               |
| 10    | 484,6         | 30    | 672,6         | 50    | 860,6         |       |               |
| 11    | 494           | 31    | 682           | 51    | 870           |       |               |
| 12    | 503,4         | 32    | 691,4         | 52    | 879,4         |       |               |
| 13    | 512,8         | 33    | 700,8         | 53    | 888,8         |       |               |
| 14    | 522,2         | 34    | 710,2         | 54    | 898,2         |       |               |
| 15    | 531,6         | 35    | 719,6         | 55    | 907,6         |       |               |
| 16    | 541           | 36    | 729           | 56    | 917           |       |               |
| 17    | 550,4         | 37    | 738,4         | 57    | 926,4         |       |               |
| 18    | 559,8         | 38    | 747,8         | 58    | 935,8         |       |               |
| 19    | 569,2         | 39    | 757,2         | 59    | 945,2         |       |               |
| 20    | 578,6         | 40    | 766,6         | 60    | 954,6         |       |               |

Таблиця 3.2.

## Відповідність каналу до довжини хвилі SWIR діапазону

| Канал | Довжина хвилі | Канал | Довжина хвилі | Канал | Довжина хвилі | Канал | Довжина хвилі | Канал | Довжина хвилі |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|
| 1     | 920           | 41    | 1288          | 81    | 1656          | 121   | 2024          | 161   | 2392          |
| 2     | 929,2         | 42    | 1297,2        | 82    | 1665,2        | 122   | 2033,2        | 162   | 2401,2        |
| 3     | 938,4         | 43    | 1306,4        | 83    | 1674,4        | 123   | 2042,4        | 163   | 2410,4        |
| 4     | 947,6         | 44    | 1315,6        | 84    | 1683,6        | 124   | 2051,6        | 164   | 2419,6        |
| 5     | 956,8         | 45    | 1324,8        | 85    | 1692,8        | 125   | 2060,8        | 165   | 2428,8        |
| 6     | 966           | 46    | 1334          | 86    | 1702          | 126   | 2070          | 166   | 2438          |
| 7     | 975,2         | 47    | 1343,2        | 87    | 1711,2        | 127   | 2079,2        | 167   | 2447,2        |
| 8     | 984,4         | 48    | 1352,4        | 88    | 1720,4        | 128   | 2088,4        | 168   | 2456,4        |
| 9     | 993,6         | 49    | 1361,6        | 89    | 1729,6        | 129   | 2097,6        | 169   | 2465,6        |
| 10    | 1002,8        | 50    | 1370,8        | 90    | 1738,8        | 130   | 2106,8        | 170   | 2474,8        |
| 11    | 1012          | 51    | 1380          | 91    | 1748          | 131   | 2116          | 171   | 2484          |
| 12    | 1021,2        | 52    | 1389,2        | 92    | 1757,2        | 132   | 2125,2        | 172   | 2493,2        |
| 13    | 1030,4        | 53    | 1398,4        | 93    | 1766,4        | 133   | 2134,4        | 173   | 2500          |
| 14    | 1039,6        | 54    | 1407,6        | 94    | 1775,6        | 134   | 2143,6        |       |               |
| 15    | 1048,8        | 55    | 1416,8        | 95    | 1784,8        | 135   | 2152,8        |       |               |
| 16    | 1058          | 56    | 1426          | 96    | 1794          | 136   | 2162          |       |               |
| 17    | 1067,2        | 57    | 1435,2        | 97    | 1803,2        | 137   | 2171,2        |       |               |
| 18    | 1076,4        | 58    | 1444,4        | 98    | 1812,4        | 138   | 2180,4        |       |               |
| 19    | 1085,6        | 59    | 1453,6        | 99    | 1821,6        | 139   | 2189,6        |       |               |
| 20    | 1094,8        | 60    | 1462,8        | 100   | 1830,8        | 140   | 2198,8        |       |               |
| 21    | 1104          | 61    | 1472          | 101   | 1840          | 141   | 2208          |       |               |
| 22    | 1113,2        | 62    | 1481,2        | 102   | 1849,2        | 142   | 2217,2        |       |               |
| 23    | 1122,4        | 63    | 1490,4        | 103   | 1858,4        | 143   | 2226,4        |       |               |
| 24    | 1131,6        | 64    | 1499,6        | 104   | 1867,6        | 144   | 2235,6        |       |               |
| 25    | 1140,8        | 65    | 1508,8        | 105   | 1876,8        | 145   | 2244,8        |       |               |
| 26    | 1150          | 66    | 1518          | 106   | 1886          | 146   | 2254          |       |               |
| 27    | 1159,2        | 67    | 1527,2        | 107   | 1895,2        | 147   | 2263,2        |       |               |
| 28    | 1168,4        | 68    | 1536,4        | 108   | 1904,4        | 148   | 2272,4        |       |               |
| 29    | 1177,6        | 69    | 1545,6        | 109   | 1913,6        | 149   | 2281,6        |       |               |
| 30    | 1186,8        | 70    | 1554,8        | 110   | 1922,8        | 150   | 2290,8        |       |               |
| 31    | 1196          | 71    | 1564          | 111   | 1932          | 151   | 2300          |       |               |
| 32    | 1205,2        | 72    | 1573,2        | 112   | 1941,2        | 152   | 2309,2        |       |               |
| 33    | 1214,4        | 73    | 1582,4        | 113   | 1950,4        | 153   | 2318,4        |       |               |
| 34    | 1223,6        | 74    | 1591,6        | 114   | 1959,6        | 154   | 2327,6        |       |               |
| 35    | 1232,8        | 75    | 1600,8        | 115   | 1968,8        | 155   | 2336,8        |       |               |
| 36    | 1242          | 76    | 1610          | 116   | 1978          | 156   | 2346          |       |               |
| 37    | 1251,2        | 77    | 1619,2        | 117   | 1987,2        | 157   | 2355,2        |       |               |
| 38    | 1260,4        | 78    | 1628,4        | 118   | 1996,4        | 158   | 2364,4        |       |               |
| 39    | 1269,6        | 79    | 1637,6        | 119   | 2005,6        | 159   | 2373,6        |       |               |
| 40    | 1278,8        | 80    | 1646,8        | 120   | 2014,8        | 160   | 2382,8        |       |               |

Перше, що сильно виділяється на зображеннях всіх трьох гіперспектральних кривих - це дві впадини в середині графіків і пониження в кінці. Так відбувається через те, що саме ці канали фіксують довжини хвиль, які поглинаються водяною парою. Волога сильно впливає на спектральний фон об'єктів, бо вода є сильним абсорбентом, який повністю поглинає випромінювання. Саме тому графіки в місцях спадів, які припадають на канали 103-110, 151-160 та 233, або повністю, або частково досягають нульового відсотка відбиття. У свою чергу перша частин графіку припадає на канали 1 -37, які містять в собі видимі довжини спектру і несуть мінімальну користь при аналізі гіперспектральної кривої.

Перший графік демонструє гіперспектральну криву характерну для окопів на території дослідження (Рис. 3.7). Важливо зазначити, що просторова роздільна здатність гіперспектральних датчиків складає 30м і навіть після використання інструменту *Pan Sharpen*, який покращує її до 5 м, спектральна роздільна здатність не покращується, бо дані які були раніше записані в 1 піксель 30х30м переносяться в 36 пікселів 5х5м. З цього можна зробити висновок, що окопи більшою мірою ідентифікуються на гіперспектральних знімках не за рахунок заглиблення, бо як правило сам окоп має ширину приблизно 0,6м, а за рахунок відвалу землі, який утворюється на межі окопів в наслідок їх побудови. Саме відвал, є ключовим індикатором окопів. Це прямо впливає на гіперспектральний профіль, тому що, ґрунт і порода, які складені компактно, знаходяться вище рівня поверхні, швидше висихають і набувають кращої відбивної здатності. Також на це впливає склад ґрунту. На території дослідження переважно трапляється ґрунт з високим вмістом піщаних часток, що робить його світлішим і теж покращує відбивну здатність.

Тому під час досліджень слід враховувати сезонні і погодні зміни, які можуть вплинути на гіперспектральні знімки. Наприклад, під час дощів ґрунт зволожується і відбивна здатність знижується через, що ускладнює ідентифікацію окопів ті інших видів пошкоджень.

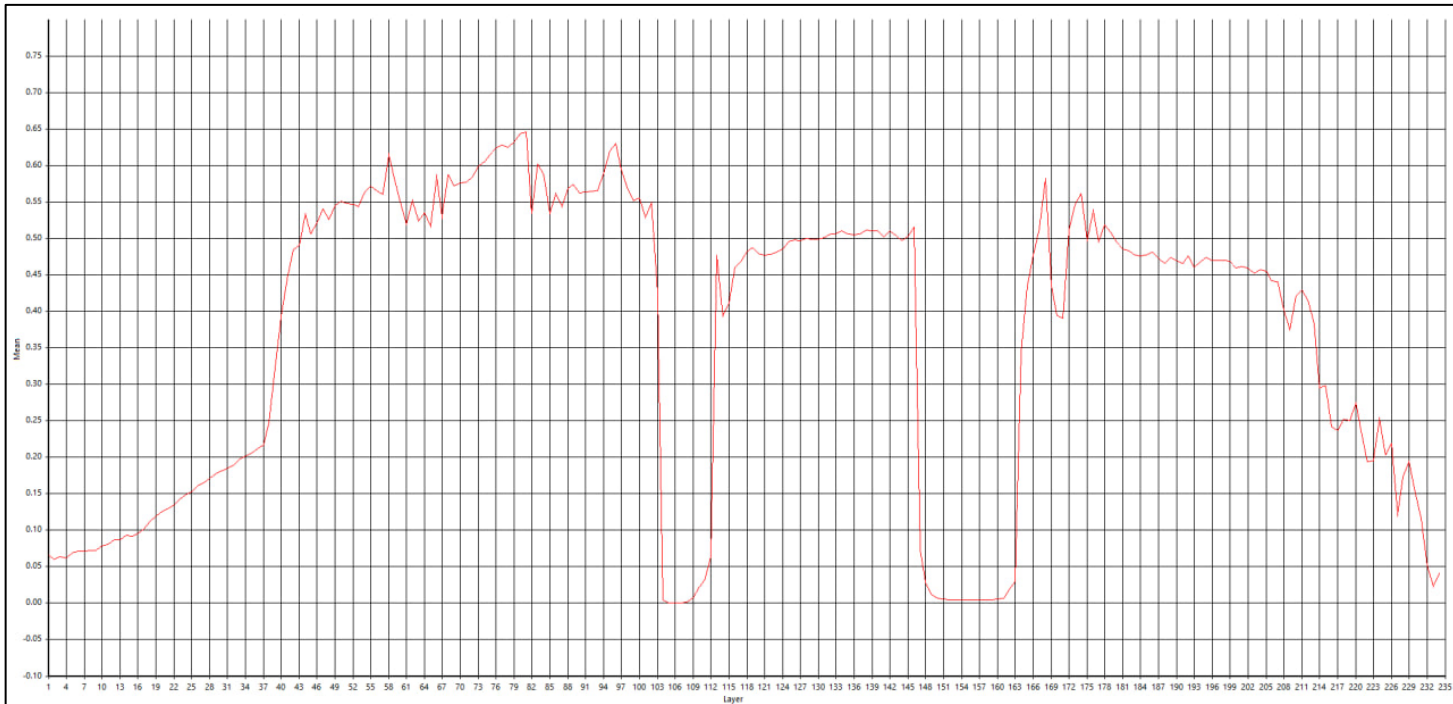


Рис. 3.7. Гіперспектральна крива, характерна для окопів на території досліджуваної місцевості

Далі була розглянута гіперспектральна крива характерна для вирв (Рис. 3.8). Головною проблемою їх ідентифікації за гіперспектральними даними є площа вирв, яка значно менша ніж просторова роздільна здатність супутника PRISMA. Через це при аналізі даної кривої враховуємо, що дані, які записані в відповідний піксель, містять не тільки спектральні характеристики вирви, а і навколишніх територій. Також порівняно з окопами вирви не мають компактного відвалу землі навколо себе, під час вибуху земля рівномірно розкидається на великі території. А на місці вибуху утворюється заглиблення, зазвичай такі місця мають більш вологий ґрунт, що призводить до меншої відбивної здатності, тому крива вирв має загальне менше відбиття, про що говорить графік.

Гіперспектральні криві вирв і пожеж на перший погляд видаються схожими, але це не так, при їх побудові враховується кожен відсоток відбиття сигналу від поверхні, і різне відбиття свідчить про різні матеріали та стан поверхні.

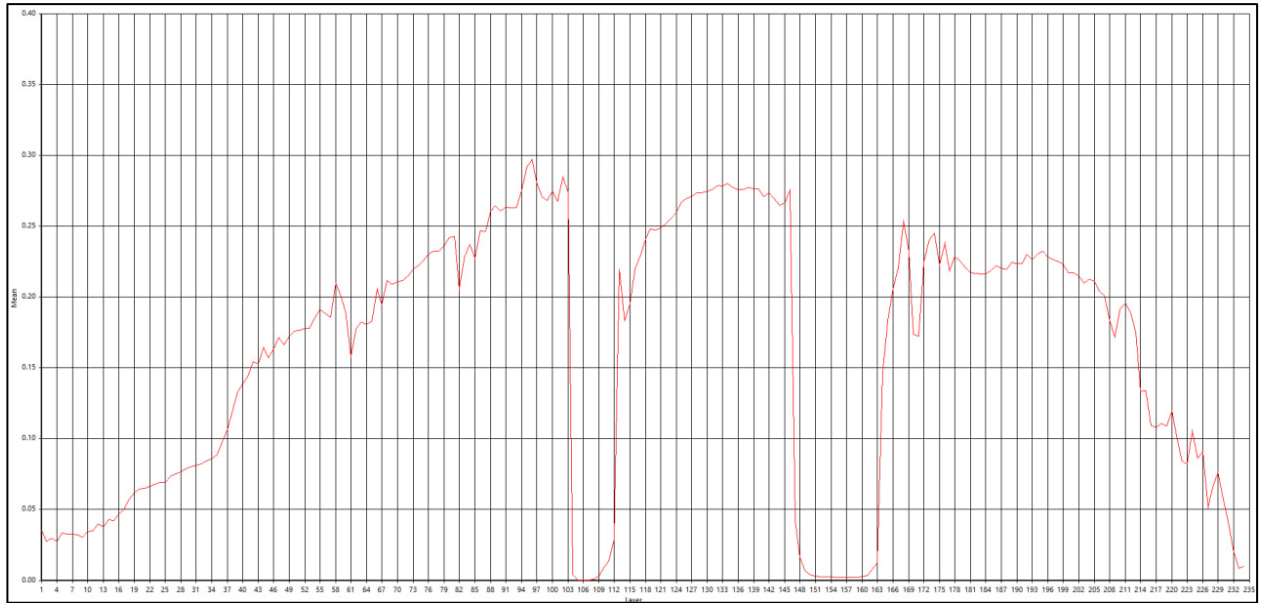


Рис. 3.8. Гіперспектральна крива, характерна для вирв на території досліджуваної місцевості

Гіперспектральна крива пожеж (Рис. 3.9), має не значні коефіцієнти відбиття, трохи більше 30 % в піковій точці, для вирв цей коефіцієнт складає менше 30 %, у той час, як у окопів майже 65%. Низький відсоток відбиття характеризується горілими ділянками. При випаленні територій втрачається значна частина відбивної здатності, через спалення рослинності та набуття поверхні чорного кольору.

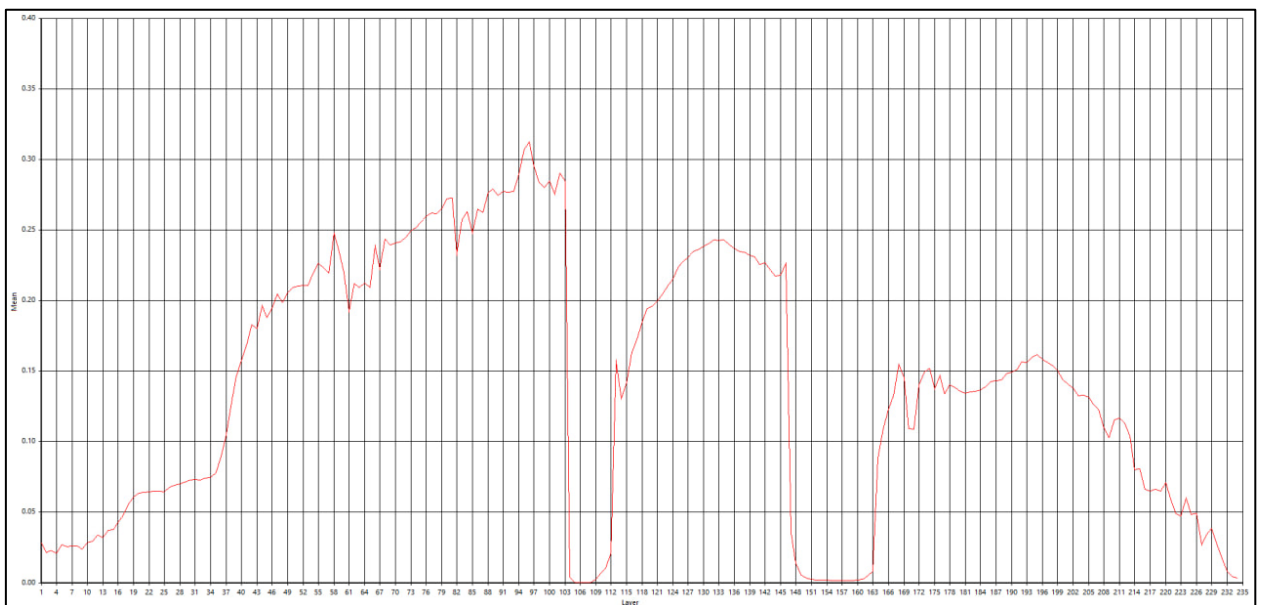


Рис. 3.9. Гіперспектральна крива, характерна для місць пожеж на території досліджуваної місцевості

Нетиповість певних ділянок графіків проявляється у зв'язку з іншими факторами, не відомими при дослідженні даної території. Як було зазначено раніше на відбивну здатність сильно впливає вологість поверхні. Це все можна пояснити особливостями рельєфу і специфікою режиму зволоження даних територій під час зйомки.

Після ідентифікації та аналізу пошкоджень сільськогосподарських угідь на території Бахмутського району Донецької області, автор за допомогою ГІС засобів підрахував площі постраждалих та вцілілих ділянок.

Таблиця 3.3.

Площі постраждалих та вцілілих територій сільськогосподарських угідь Бахмутського району Донецької області за типами пошкоджень

|  | Ділянка №1<br>м2 / % |      | Ділянка №2<br>м2 / % |      | Ділянка №3<br>м2 / % |      | Ділянка №4<br>м2 / % |      | Ділянка №5<br>м2 / % |      | Ділянка №6<br>м2 / % |      |
|--|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
| Здорова<br>рослинність                   | 77<br>615            | 2,9  | 967<br>305           | 23,2 | 315<br>254           | 27,4 | 549<br>297           | 32,8 | 371<br>189           | 7,6  | 465<br>932           | 25,0 |
| Суха<br>рослинність                      | 1 329<br>731         | 50,0 | 842<br>115           | 20,3 | 34<br>722            | 3,0  | 378<br>486           | 22,6 | 615<br>957           | 12,5 | 1 115<br>194         | 59,9 |
| Території<br>нещодавніх<br>пожеж         | 106<br>365           | 4,0  | 587<br>905           | 14,1 | 193<br>405           | 16,8 | 104<br>540           | 6,3  | 104<br>608           | 2,1  | 24 083               | 1,3  |
| Старі<br>пожежі                          | 1 070<br>841         | 40,3 | 1 344<br>282         | 32,3 | 578<br>459           | 50,3 | 588<br>118           | 35,2 | 3 468<br>334         | 70,6 | 116<br>767           | 6,3  |
| Відкритий<br>грунт,<br>вирви та<br>окопи | 72<br>879            | 2,8  | 419<br>151           | 10,1 | 27<br>777            | 2,4  | 51<br>732            | 3,1  | 349<br>134           | 7,1  | 141<br>115           | 7,6  |
| Загальна<br>площа<br>ділянки             | 2 657<br>431         | 100  | 4 160<br>758         | 100  | 1 149<br>617         | 100  | 1 672<br>173         | 100  | 4 909<br>222         | 100  | 1 863<br>091         | 100  |

За розрахунками та оцінками автора здорова рослинність на різних ділянках коливається від 2.9% до 27.4%. Найбільший відсоток здорової рослинності спостерігається на ділянці №3, що свідчить про меншу активність бойових дій на даній території. Найгірша ситуація зі здоровою рослинністю спостерігається на ділянці №1 значні втрати рослинного покриву свідчать про високу активність ведення вогню на цій ділянці. Суха рослинність займає значну

частину всіх територій. На ділянці №6 вона становить 59.9%, що є найбільшим показником, це свідчить про відсутність масштабних пожеж. Ділянка №1 також має доволі високий відсоток сухої рослинності - 50%.

Найбільш постраждалою від нещодавніх пожеж є ділянка №2 (12.7%). Це свідчить про масштабні пожежі, які значно пошкодили рослинний покрив. Найменший відсоток випалених територій спостерігається на ділянці №5 (1.0%), це вказує на відсутність недавніх великих пожеж. Але аналізуючи старі пожежі можна сказати, що дана ділянка значною мірою постраждала від них. Також старі пожежі залишили значні пошкодження на всіх ділянках, а особливо на ділянці №4, де їхня площа становить 32.8%. В майбутньому такі ділянки потребуватимуть ретельного моніторингу та заходів з відновлення.

Наявність відкритого ґрунту, вирв та окопів значною мірою поширена на ділянці №2 (15.5%). Це може бути пов'язано з активними бойовими діями або іншими антропогенними впливами. Найменший відсоток таких територій спостерігається на ділянці №1 (2.8%), що може свідчити про менший ступінь руйнувань або ефективні заходи з відновлення територій.

*Таблиця 3.4.*

Площі постраждалих та вцілілих територій сільськогосподарських угідь  
Бахмутського району Донецької області

| Території  | Ділянка №1 | Ділянка №2 | Ділянка №3 | Ділянка №4 | Ділянка №5 | Ділянка №6 | Всього |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|
| Пошкоджені | 47,1       | 56,5       | 69,6       | 44,5       | 79,9       | 15,1       | 52,1   |
| Вцілілі    | 52,9       | 43,5       | 30,4       | 55,5       | 20,1       | 84,9       | 47,9   |

Загалом сільськогосподарські угіддя Бахмутського району зазнали значних пошкоджень через воєнні дії, включаючи вибухи, пожежі та побудова фортифікацій. Рівень пошкоджень змінюється між ділянками, з найбільшими відсотком руйнуваннями на ділянках №2, №3 та №5, та відносно меншими на ділянках №1 та №6, що може свідчити про розташуванням поза зоною активних боїв.

В сумі 52,1% сільськогосподарських угідь на досліджуваних територіях постраждали, що має значний вплив на майбутній потенціал даного регіону. автор звертає увагу, що це показник пошкодження не всіх сільськогосподарських угідь Бахмутського району Донецької області, а лише тих що знаходилися в зоні дослідження.

Для ефективного відновлення сільськогосподарських угідь району потрібен комплексний підхід, що поєднує відновлювальні заходи та довгострокові стратегії збереження і розвитку. Такий план дозволить мінімізувати негативні наслідки війни для аграрного сектору та забезпечити сталий розвиток господарської складової досліджуваного регіону.

### **3.2. Верифікація результатів за мультиспектральними даними**

Для верифікації класифікованих пошкоджень були залучені мультиспектральні дані. Мультиспектральна зйомка зазвичай фіксує світло в невеликій кількості, від 3 до 15, спектральних смуг. За рахунок цього підвищується просторова роздільна здатність, що допоможе візуально дешифрувати пошкоджені території.

Для проведення візуальної верифікації пошкоджених ділянок було взято дані від космічної місії PlanetScope. Це унікальна система, що складається з понад 130 малих супутників SuperDoves. Її особливістю є те, що кожного дня супутники сканують понад 200 мільйонів квадратних кілометрів земної поверхні, забезпечуючи актуальними знімками практично весь світ. SuperDoves мають просторову роздільну здатність 3 метри та здійснюють зйомку в чотирьох спектральних каналах (RGB+NIR), панхроматичний канал відсутній. Важливою перевагою є автоматичний режим зйомки, без потреби програмування та планування траєкторії польотів та зйомок. Також супутники сімейства PlanetScope мають невеликі розміри 10x10x30 см та вага 4,7 кг, що робить їх виробництво дешевшим і дозволяє створювати великі групи. В ході первинної

обробки (геометричної та радіометричної корекції), знімки отримують точність прив'язки 5-8 метрів.

Мультиспектральні зображення формуються шляхом фіксації електромагнітного випромінювання в специфічних діапазонах довжин хвиль, в тому числі і тих, які виходять за межі видимого світла. Спеціальні фільтри або сенсори використовуються для виділення потрібних ділянок спектру, вони чутливі до певних довжин хвиль, включаючи інфрачервоний та ультрафіолетовий діапазони [65]. Така технологія дає можливість отримувати набагато більше інформації про досліджувані об'єкти, ніж при використанні лише видимого світла, яке сприймається людським оком через рецептори сітківки, яка чутлива лише до червоного, зеленого та синього кольорів.

Варто зазначити, що для верифікації були взяті знімки космічної місії PlanetScore за 23.08.2022, а класифікація проводилась за гіперспектральними знімками від 24.08.2022. Це відбувається через те що, автор обмежений супутниковими даними, бо дані можуть бути відсутніми, або непридатними через хмари чи спектральні шуми. Тому можуть зустрічатися візуальні розбіжності в деяких зображеннях.

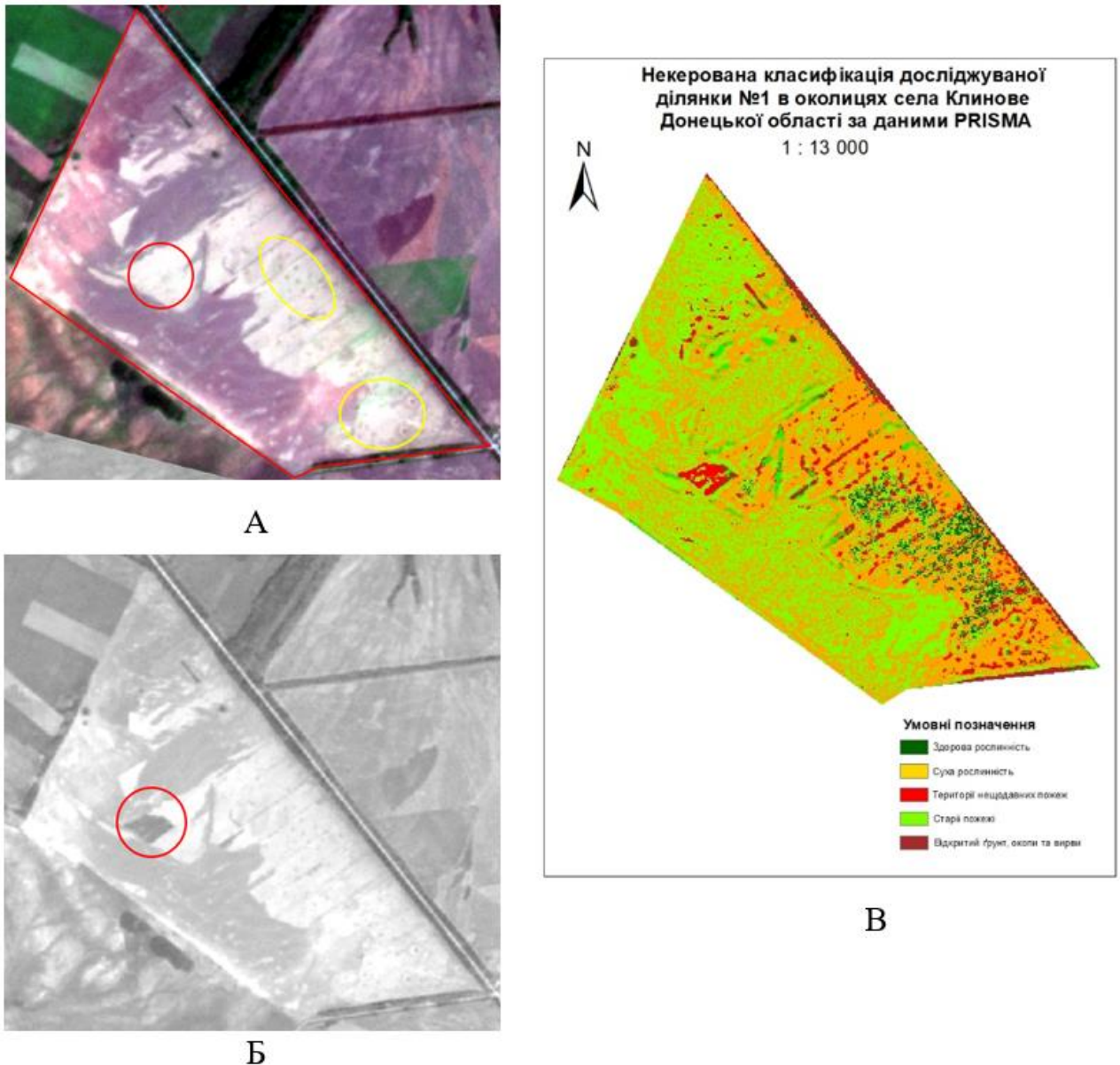


Рис. 3.10. Верифікація результатів класифікації методами фотоінтерпретації досліджуваної ділянки №1; А – знімок від PlanetScore, Б – знімку з супутнику PRISMA, В – Класифікація

На ділянці №1 (Рис. 3.10) виділено червоним колом місце пожежі, якій менше доби, про це свідчить її відсутність на знімку від PlanetScore (Рис. 3.10, А) і наявність в класифікації та на знімку з супутнику PRISMA (Рис. 3.10, Б). Також бачимо на мультиспектральному знімку виділені жовтими колами вирви, які також зображені на класифікації, тобто можна свідчити про те, що класифікація проведена коректно. На некласифікованих знімках чітко видно

сліди від пожеж, але з меншою яскравістю, що свідчить про те що вони були давно і це також чітко ідентифіковано виділено салатовим кольором на класифікації .

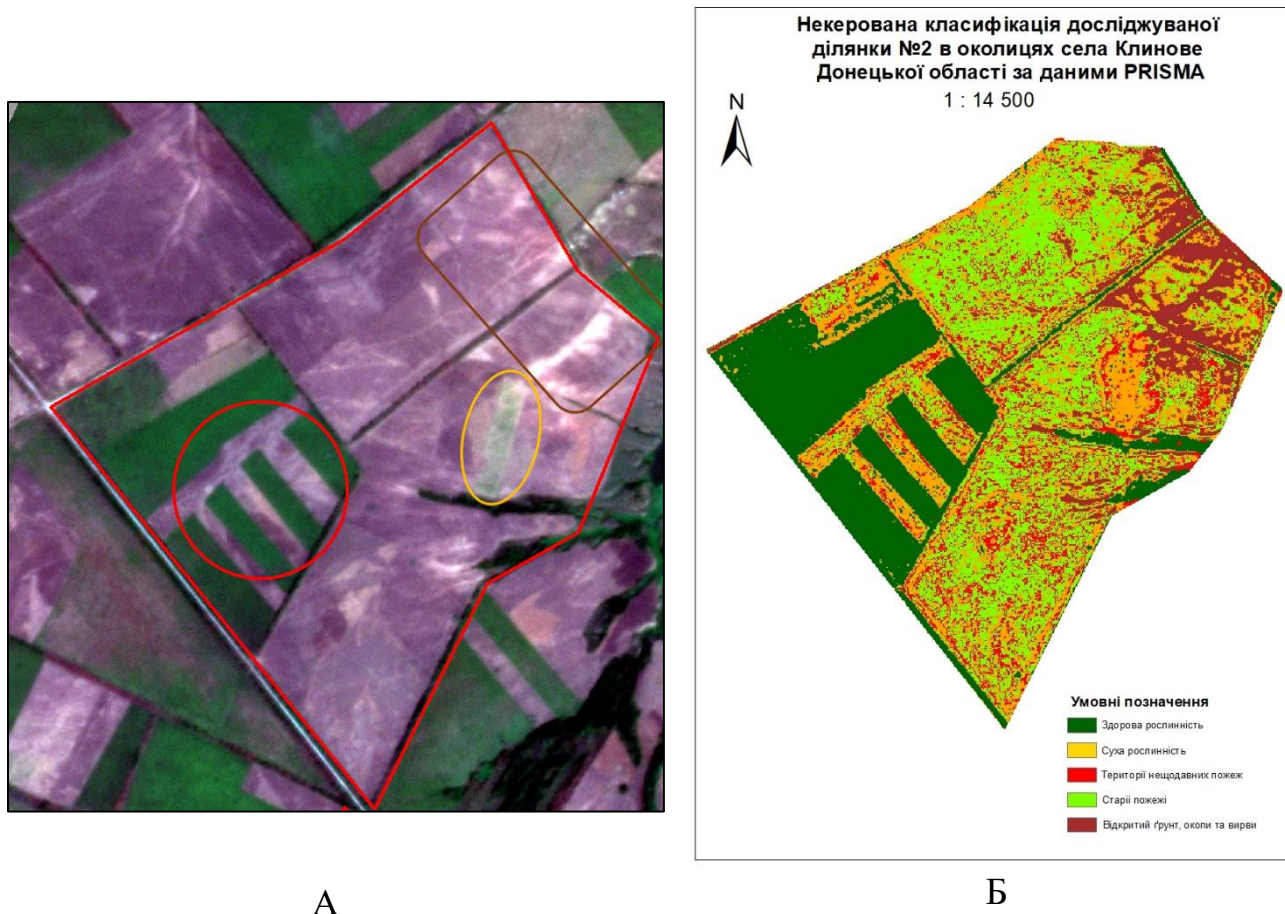


Рис. 3.11. Верифікація результатів класифікації методами фотоінтерпретації досліджуваної ділянки №2; А – знімок від PlanetScore, Б – Класифікація

На ділянці №2 (Рис. 3.11, А) для верифікації було виділено ключові моменти, такі як нещодавні пожежі, суха трава та ділянки відкритого ґрунту. Червоним колом виділені локальні нещодавні пожежі, вони на знімку виглядають, як більш темні плями. Розташовані між ділянок живої рослинності, яка теж добре класифікувалась і позначена зеленим кольором. Помаранчевий еліпс позначає місце значного об'єму сухої трави, яка в класифікації теж

помаранчева. І останнім виділеним елементом є відкритий ґрунт, обведений коричневим прямокутником і на класифікації позначений коричневим кольором. Розмитість ділянок та відсутність лінійності відкритого ґрунту свідчить про їх природне походження, яке є наслідком вітрової та водної ерозій. Значна частина знімку від PlanetScore (Рис. 3.11, Б) має сірий колір, що свідчить про масштабні пожежі. На класифікації ці ділянки виділені салатовим кольором

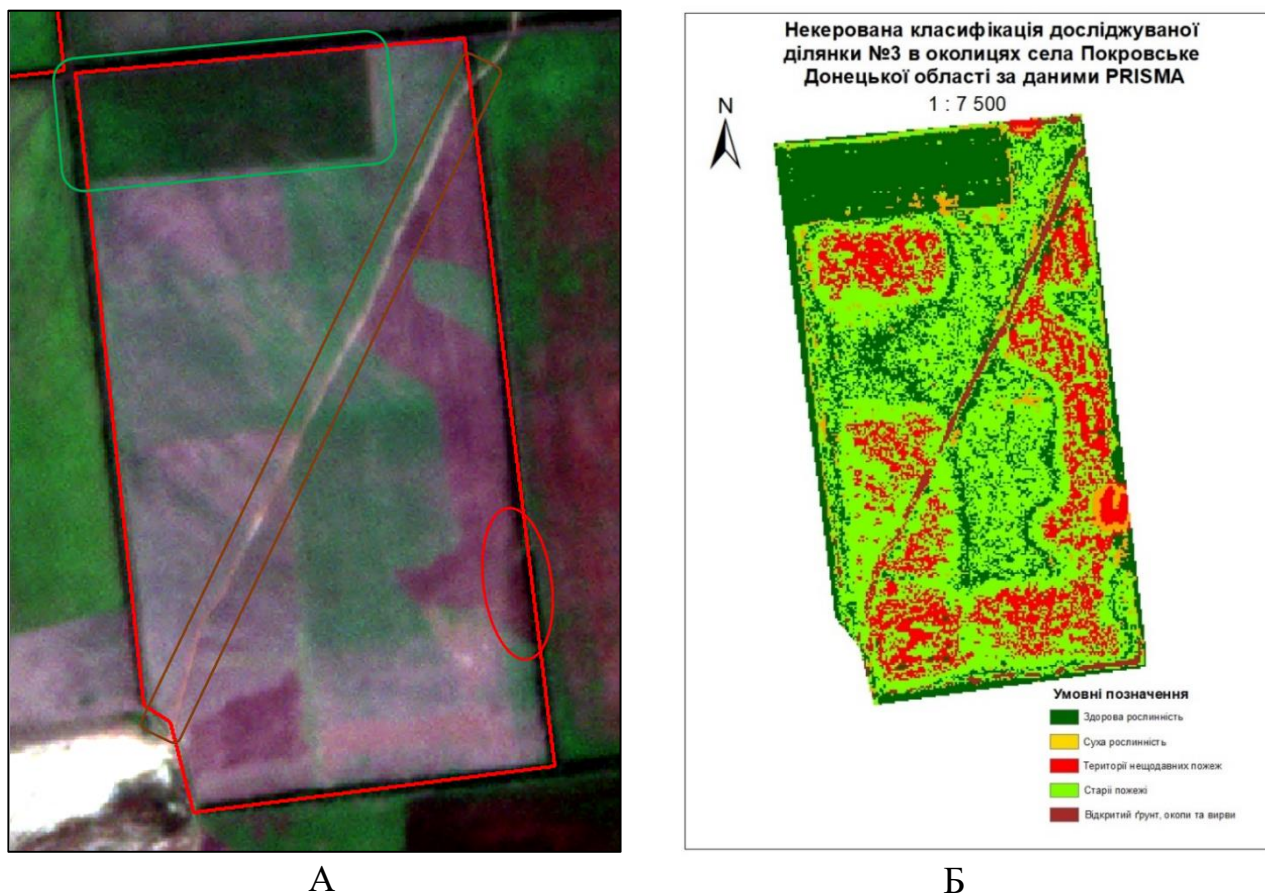


Рис. 3.12. Верифікація результатів класифікації методами фотоінтерпретації досліджуваної ділянки №3; А – знімок від PlanetScore, Б – Класифікація

Ділянка №3 виділяється новим типом пошкодження, якого не було верифіковано до цього – окопи. Через весь знімок виділено коричневим прямокутником світлу полосу, це і є окоп (Рис. 3.12, А). На класифікації (Рис. 3.12, Б) він виділений коричневим кольором. Далі зображено червоний еліпс, який позначає місце нещодавньої пожежі і відповідно цю ділянку класифіковану

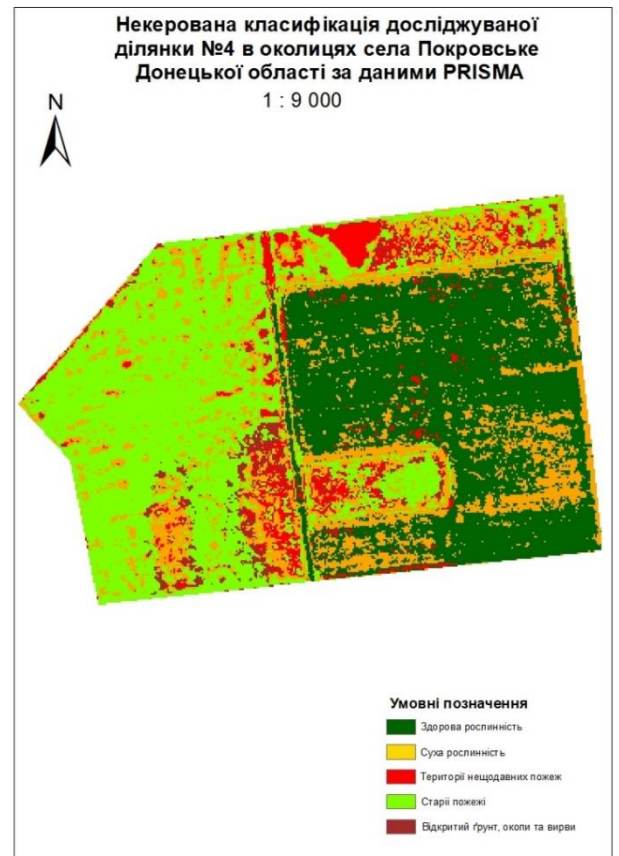
червоним на тому ж місці. Зеленим прямокутником виділено густу здорову рослинність у верхній частині знімку, також вона чітко ідентифікована на класифікації. Також по всій площі знімку присутні чіткі чорні плями, що свідчать про нещодавні пожежі, які теж чітко класифікувалися.



А



Б



В

Рис. 3.13. Верифікація результатів класифікації методами фотоінтерпретації досліджуваної ділянки №4; А – знімок від PlanetScore, Б - знімку з супутника Sentinel-2, В – Класифікація

Для верифікації пошкоджень на даній ділянці було додатково залучено дані з супутника Sentinel-2 (Рис. 4 Б) за 31.08.2022. Червоними колами виділено місця нещодавніх пожеж (Рис. 3.13, Б), які чітко класифікувалися і мають високу концентрацію червоного кольору в цих місцях. Жовтим еліпсом виділено місце великої концентрації вирв, які класифікувалися, як відкритий ґрунт і позначені

коричневим кольором на класифікації (Рис. 3.13, В). Також чітко класифікувалися здорова рослинність (зелений колір класифікації) в східній частині знімку, та вигорілі ділянки (салатовий колір класифікації) в західній.

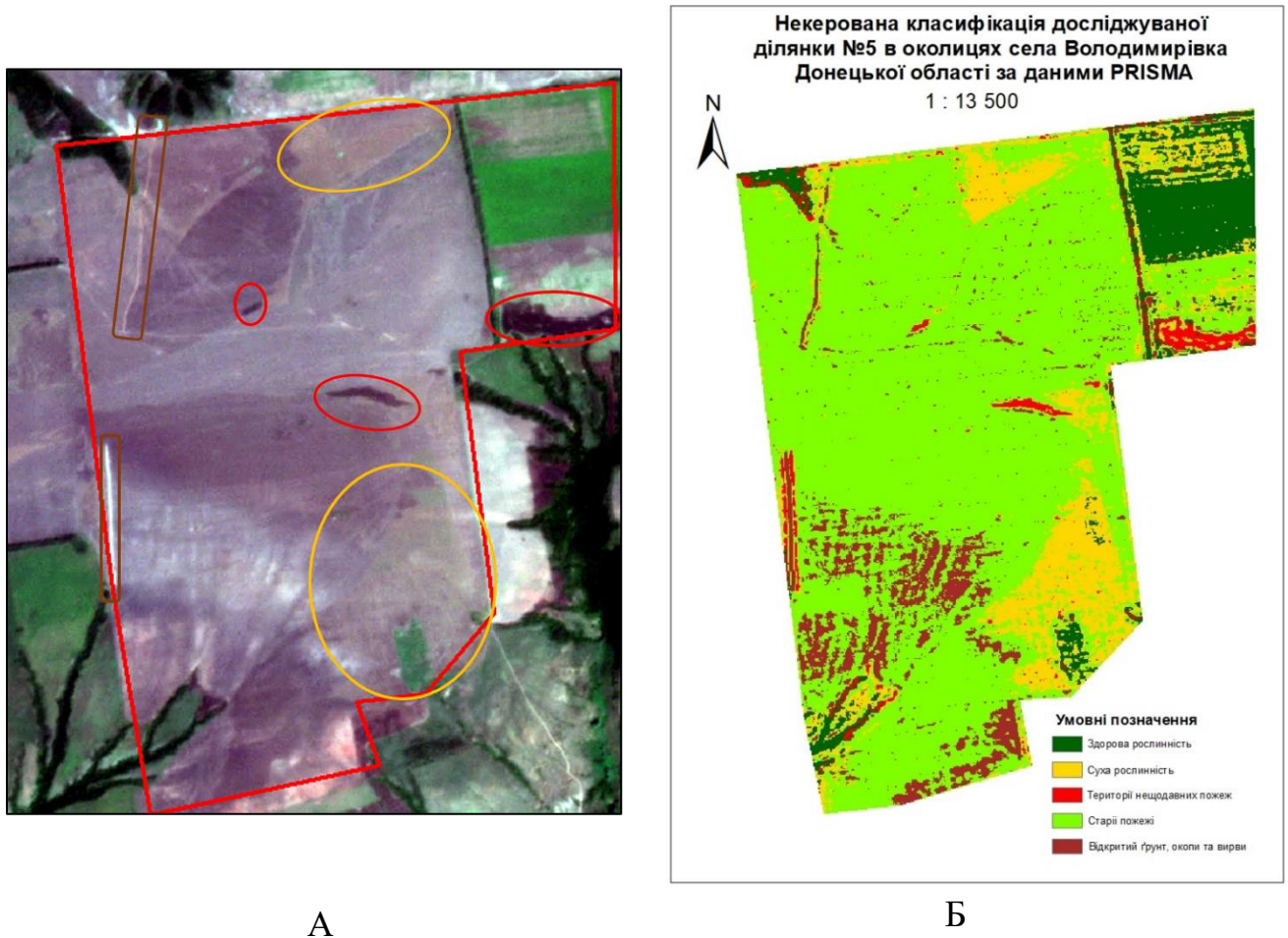


Рис. 3.14. Верифікація результатів класифікації методами фотоінтерпретації досліджуваної ділянки №5; А – знімок від PlanetScore, Б – Класифікація

Ділянка №5 сильно постраждала від пожеж, про що свідчать сірі кольори по всій території знімку від PlanetScore (Рис. 3.14, А), та салатовий колір на класифікованому зображенні (Рис. 3.14, Б). Червоними колами виділені чорні плями на знімку (Рис. 3.14, А), які свідчать про нещодавні інтенсивні пожежі, які чітко ідентифіковані та виділені в класифікації. Помаранчеві еліпси вказують на вцілілі частини поля, де зберіглася суха трава. Вона класифікована

помаранчевим кольором (Рис. 3.14, Б). На супутниковому знімку (Рис. 3.14, А) коричневими прямокутниками виділені окопи, в класифікації вони позначені теж коричневим кольором, але є інші ділянки коричневого кольору. В даному випадку окопи ідентифікуються не лише візуально, а й геометрично. Окопи мають лінійні форми, а відкритий ґрунт – нечіткі, які характеризуються ділянками різної форми, інтенсивності та чіткості.

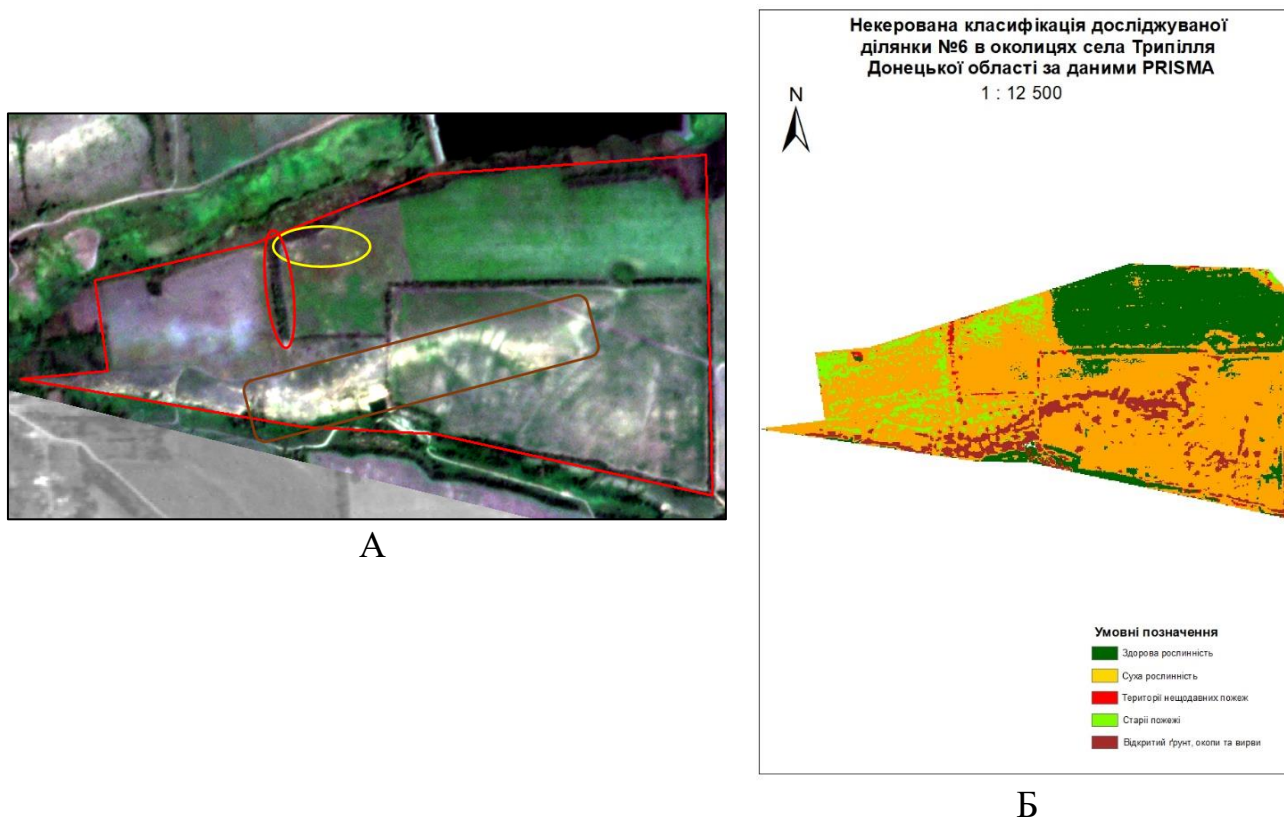


Рис. 3.15. Верифікація результатів класифікації методами фотоінтерпретації досліджуваної ділянки №6; А – знімок від PlanetScore, Б – Класифікація

Ділянка №6 має найбільший відсоток вцілілих територій, що видно і візуально по фотознімку (Рис. 3.15, А), і по класифікації (Рис. 3.15, Б). Червоним еліпсом виділена вигоріла посадка, яка чітко ідентифікована та позначена червоним кольором на класифікації. Жовтий еліпс окреслює місця вирв, які точково ідентифіковані та позначені коричневим кольором на класифікації. Коричневий прямокутник окреслює великі території, на яких розташовані окопи

та оборонні споруди. Вони займають значні площі, тому на класифікації мають не чіткі форми, але загальна лінійність зберігається, що і свідчить про антропогенне походження даних ділянок відкритого ґрунту. На класифікації вони позначені коричневим кольором.

Провівши верифікацію класифікованих пошкоджень автор визначив, що некерована класифікація, доволі чітко розрізняє типи поверхонь. Правильно визначає пошкоджені ділянки та додає їх в спільні класи.

### **3.3. Висновки за результатами гіперспектрального аналізу території дослідження**

В рамках даного дослідження автором була доопрацьована і випробувана методика, яка спрощує візуалізацію та оцінку пошкоджень сільськогосподарських угідь на 6 ділянках Бахмутського району Донецької області. Постраждалих внаслідок активних бойових дій. Для проведення дослідження були використані гіперспектральні дані з супутника PRISMA.

Попіксельною класифікацією було візуалізовано три основні типи пошкоджень: вирви, окопи та місця пожеж. Для кожного з цих типів були побудовані характерні гіперспектральні криві. В майбутньому вони дозволять швидко та точно ідентифікувати подібні пошкодження на інших територіях. При дослідженні було враховано, що на гіперспектральні характеристики матеріалів та поверхонь суттєво впливають погодні особливості та вологість ґрунту. Ці фактори необхідно обов'язково враховувати при аналізі супутникових знімків для коректної інтерпретації даних.

Аналіз окремих ділянок показав, що ділянка №6 має найвищий відсоток сухої рослинності (59.9%). Ділянка №1 має найбільший відсоток територій, постраждалих від старих пожеж (40.3%). Найбільший відсоток здорової рослинності спостерігається на ділянці №3 (27.4%), що свідчить про відносно менші пошкодження в цій зоні. Території нещодавніх пожеж найбільше

займають площу на ділянці №2 (12.7%), відкритий ґрунт, вирви та окопи найбільш теж найбільш поширені на ділянці №2 (15.5%).

В результаті розрахунку площ постраждалих територій було виявлено, що рівень пошкоджень на досліджуваних ділянках - різний. За проведеними підрахунками автора, 52,1% сільськогосподарських угідь на досліджуваних територіях зазнали руйнувань різного ступеню внаслідок ведення активних бойових дій. Такі наслідки мають значний негативний вплив на аграрний потенціал регіону і потребують тривалого відновлення.

Результати проведеного дослідження демонструють ефективність застосування гіперспектральних супутникових даних для дослідження та оцінки пошкоджень сільськогосподарських угідь внаслідок воєнних дій. Розроблена та перевірена методика може бути застосована для моніторингу та проведення аналізу постраждалих територій в інших регіонах України, які також зазнали руйнувань в наслідок війни.

## ВИСНОВКИ

За результатами проведеного дослідження, було зроблено такі висновки:

1. Доцільно стверджувати, що гіперспектральне дистанційне зондування є найсучаснішою технологією, яка дозволяє ідентифікувати та картографувати матеріали земної поверхні з високою точністю. Дана технологія знайшла застосування в дослідженнях якості води, оцінки стану рослинності та виявлення хімічних забруднень у різних середовищах. Зокрема, у Китаї дані гіперспектрального зондування було використано для дослідження та оцінки шкідливих речовин у водоймах, їх концентрації та розповсюдження.

На сучасному етапі гіперспектральні знімки все частіше використовуються для аналізу стану сільськогосподарських угідь у всьому світі, особливо для ідентифікації типів рослин та оцінки їхнього стану. Такі методи дослідження включають в себе використання індексів, таких як *NDVI*, що застосовується для вимірювання загального стану здоров'я рослинності та виявлення стресів, викликаних шкідниками, хворобами або воєнними діями.

2. Попередньо оглянувши досліджувані ділянки у Бахмутському районі Донецької області, виявлено різні типи пошкоджень сільськогосподарських угідь, такі як: вирви, окопи та місця пожеж. Дані пошкодження були чітко ідентифіковані завдяки гіперспектральним знімкам. Це дало можливість отримати дані про стан землі та рослинності в межах досліджуваних територій. Наприклад, на околицях сіл Клинове та Покровське було ідентифіковано значну кількість пошкоджень через пожежі та через побудову оборонних споруд, в тому числі і окопів, які чітко відображені на гіперспектральних знімках.

3. Гіперспектральні зображення надають можливість детально досліджувати та аналізувати спектральні характеристики різних матеріалів на поверхні Землі. Для обробки цих даних ефективно себе зарекомендувало програмне забезпечення - *ERDAS IMAGINE*, яке має широкий вибір інструментів, в тому числі для ортотрансформацій, побудови мозаїк, класифікацій зображень

та покращення роздільної здатності знімків. Знімки з супутника *PRISMA*, який несе на собі гіперспектральну та панхроматичну камерами - фіксував ними 234 канали, які використовуються для ідентифікації та аналізу різноманітних пошкоджень земної поверхні. Завдяки високим просторовій та спектральній роздільній здатності, такі дані дозволили точно визначити ділянки з пошкодженою рослинністю, пожежами чи вирвами. Застосування такої технології надало значну перевагу та підвищило ефективність моніторингу та оцінки екологічних змін, викликаних антропогенним впливом або природними катастрофами.

4. Автором доопрацьовано і використано методику, яка використовує гіперспектральні знімки для ідентифікації та оцінки пошкоджень сільськогосподарських угідь. Проаналізувавши досліджувані території Бахмутського району було доведено, що значна частина територій постраждала від пожеж та механічних пошкоджень таких, як вирви і окопи, які були спричинені активними бойовими діями. Виявлено, що це негативно впливає на родючість ґрунту та стан рослинності на цих ділянках. Класифікація та аналіз даних знімків дозволили точно ідентифікувати зони з вигорілою рослинністю, вирвами від вибухів та окопами, що суттєво руйнують структуру ґрунту. Таким чином, було підраховано площі пошкоджених і вцілілих територій за типами пошкоджень та визначено, що в середньому, саме досліджувані сільськогосподарські угіддя пошкоджені на 52,1%. Точність та оперативність проведених підрахунків підтвердило те, що використання гіперспектральних даних значно покращує результати оцінки пошкоджень та дані показники є критично важливими для планування відновлювальних заходів на цих територіях.

5. Використавши для верифікації результатів гіперспектрального аналізу, мультиспектральні знімки кращої роздільної здатності, від космічної місії *PlanetScope*, доведено адекватність результатів класифікації пошкоджень, виконаної на основі гіперспектральних даних, шляхом візуального порівняння

мультиспектральних знімків та класифікації гіперспектральних знімків досліджуваних ділянок.

Таким чином, у даній роботі було доведено, що пропонована методика та гіперспектральні дані є ефективним інструментом для виявлення та оцінки пошкоджень земної поверхні на прикладі точності дослідження зони бойових дій. Тому, отримані результати доцільно використовувати для розробки стратегій моніторингу та відновлення постраждалих територій.

В перспективі майбутнього використання розробленої методики для дослідження пошкоджень сільськогосподарських угідь треба уточнювати спектральні дані з супутника PRISMA. Це можна робити за рахунок залучення таких супутникових даних, як ENMAP. Дане удосконалення методу планується реалізувати в магістерській роботі.

## СПИСОК ВИКОРИСАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Знищення Каховського моря: які наслідки російського екоциду для Запоріжжя та області. Перший Запорізький. Перший Запорізький. Новини Запоріжжя. URL: <http://1news.zp.ua/znishheniya-kahovskogo-vodoshovishha-yaki-naslidki-dlya-zaporizhzhya/> (дата звернення: 15.03.2024).
2. Підрив Каховської ГЕС: загрози та економічні наслідки. finance.ua. URL: [://finance.ua/ua/goodtoknow/pidryv-kahovskoi-ges#headline\\_5](://finance.ua/ua/goodtoknow/pidryv-kahovskoi-ges#headline_5) (дата звернення: 15.03.2024).
3. Sentinel 2A/2B. TVIS. URL: <https://tvis.com.ua/ua/satellites/sentinel/> (дата звернення: 10.03.2024).
4. Landsat 8. landsat science. Landsat Science. A joint NASA/USGS Earth observation program. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/> (дата звернення: 10.03.2024).
5. Історія розвитку - Нікопольське управління захисних масивів дніпровських водосховищ. Нікопольське управління захисних масивів дніпровських водосховищ. URL: <https://www.nik-up.gov.ua/istoriia-rozvytku/#:~:text=%20максимальна%20ширина%20%2024%20км;,за%20хронологічним%20порядком%20після%20Запорізької.> (дата звернення: 15.03.2024).
6. Assessing eco-scarcity as a cause of the outbreak of conflict in Darfur: a remote sensing approach. Taylor & Francis Online. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161003674592>
7. Analysis of the Impacts of armed conflict on the Eastern Afromontane forest region on the South Sudan — Uganda border using multitemporal Landsat imagery. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425711003804?via%3Di> hub (дата звернення: 16.03.2024).

8. End-of-conflict deforestation: Evidence from Colombia's peace agreement. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X19305017?via%3Dihub> (дата звернення: 16.03.2024).
9. Humanitarian applications of machine learning with remote-sensing data: review and case study in refugee settlement mapping / J. A. Quinn et al. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2018. Vol. 376, no. 2128. P. 16. (дата звернення: 16.03.2024).
10. Marx A. J., Loboda T. V. Landsat-based early warning system to detect the destruction of villages in Darfur, Sudan. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 136. P. 126–134. (дата звернення: 17.03.2024).
11. Prins E. Use of low cost Landsat ETM+ to spot burnt villages in Darfur, Sudan. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 29, no. 4. P. 1207–1214. (дата звернення: 17.03.2024).
12. Anderson D., Lochery E. Violence and Exodus in Kenya's Rift Valley, 2008: Predictable and Preventable?. *Journal of Eastern African Studies*. 2008. Vol. 2, no. 2. P. 328–343. (дата звернення: 20.03.2024).
13. Lee C., de Vries W. T. Bridging the Semantic Gap between Land Tenure and EO Data: Conceptual and Methodological Underpinnings for a Geospatially Informed Analysis. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 255 (дата звернення: 19.03.2024).
14. Assessing sustainable development prospects through remote sensing: A review. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938520302974?via%3Dihub>
15. Branch, J. Geographic information systems (GIS) in international relations. *Int. Organ.* 2016. №70. P. 845–869. (дата звернення: 27.03.2024).
16. Impact of COVID-19 Lockdown on the Fisheries Sector: A Case Study from Three Harbors in Western India. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/2/183> (дата звернення: 25.03.2024).

17. World Heritage in danger: Big data and remote sensing can help protect sites in conflict zones / N. Levin et al. *Global Environmental Change*. 2019. Vol. 55. P. 97–104. (дата звернення: 27.03.2024).

18. Combining automatic and manual image analysis in a web-mapping application for collaborative conflict damage assessment / C. Knoth et al. *Applied Geography*. 2018. Vol. 97. P. 25–34. (дата звернення: 27.03.2024).

19. Hagenlocher M., Lang S., Tiede D. Integrated assessment of the environmental impact of an IDP camp in Sudan based on very high resolution multi-temporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 126. P. 27–38. (дата звернення: 28.03.2024).

20. Як російська війна шкодить українським ґрунтам – результати дослідження. Екодія URL: <https://ecoaction.org.ua/grunty-doslidzhennia.html> (дата звернення: 05.03.2024).

21. Performance assessment of ACORN atmospheric correction algorithm. SPIED.IGITALLIBRARY URL :  
 HTTPS://WWW.SPIEDIGITALLIBRARY.ORG/CONFERENCE-PROCEEDINGS-OF-SPIE/4725/0000/PERFORMANCE-ASSESSMENT-OF-ACORN-ATMOSPHERIC-CORRECTION-ALGORITHM/10.1117/12.478777.FULL#\_=\_ (дата звернення: 03.04.2024).

22. Status of atmospheric correction using a MODTRAN4-based algorithm SPIED.IGITALLIBRARY URL :  
 HTTPS://WWW.SPIEDIGITALLIBRARY.ORG/CONFERENCE-PROCEEDINGS-OF-SPIE/4049/1/STATUS-OF-ATMOSPHERIC-CORRECTION-USING-A-MODTRAN4-BASED-ALGORITHM/10.1117/12.410341.FULL#\_=\_ (дата звернення: 03.04.2024).

23. Hyperspectral signal decomposition and symptom detection of wheat rust disease at the leaf scale using pure fungal spore spectra as reference / D. Bohnenkamp et al. *Plant Pathology*. 2019. Vol. 68, no. 6. P. 1188–1195. (дата звернення: 03.04.2024).

24. Hyperspectral NIR image analysis : data exploration, correction, and regression. *SLU publication database (SLUpub)*. URL: <https://publications.slu.se/?file=publ/show&id=12694> (дата звернення: 03.04.2024).
25. Crop losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security / S. Savary et al. *Food Security*. 2012. Vol. 4, no. 4. P. 519–537. (дата звернення: 04.04.2024).
26. Ashourloo D., Mobasher M., Huete A. Developing Two Spectral Disease Indices for Detection of Wheat Leaf Rust (Puccinia triticina). *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6, no. 6. P. 4723–4740. (дата звернення: 04.04.2024).
27. Cho M. A., Skidmore A. K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 101, no. 2. P. 181–193. (дата звернення: 04.04.2024).
28. Detection of Powdery Mildew in Two Winter Wheat Plant Densities and Prediction of Grain Yield Using Canopy Hyperspectral Reflectance / X. Cao et al. *PLOS ONE*. 2015. Vol. 10, no. 3. P. e0121462. (дата звернення: 03.04.2024).
29. Early Disease Detection in Wheat Fields using Spectral Reflectance. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511002002696?via%3Di> hub (дата звернення: 03.04.2024).
30. Automatic detection of ‘yellow rust’ in wheat using reflectance measurements and neural networks / D. Moshou et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2004. Vol. 44, no. 3. P. 173–188. (дата звернення: 04.04.2024).
31. Hyperspectral remote sensing technology for water quality monitoring: knowledge graph analysis and Frontier trend / T. Ma et al. *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. (дата звернення: 03.04.2024).
32. CHRIS. *Earth Online*. URL: <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/chris> (дата звернення: 08.04.2024).

33. Editorial: Hyperspectral imaging in environmental monitoring and analysis / R. Rajabi et al. *Frontiers in Environmental Science*. 2024. Vol. 11. (дата звернення: 08.04.2024).

34. Реалії Д., Тимошенко Д., Якубович Т. «Ми нарешті стали українцями»: як у місті, де працював більшовик Артем, сприймають війну. *Радіо Свобода*. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/29552854.html> (дата звернення: 08.04.2024).

35. Як війна вплинула на галузі сільського господарства Бахмутського району. *Бахмутська РДА*. URL: <https://bahmutska-rda.gov.ua/news/1700379881/> (дата звернення: 08.04.2024).

36. В Україні близько 5 мільйонів гектарів орних земель не використовуються через війну. Укрінформ - актуальні новини України та світу. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3818267-v-ukraini-blizko-5-miljoniv-gektariv-ornih-zemel-ne-vikoristovuutsa-cerez-vijnu.html> (дата звернення: 08.04.2024).

37. Як війна впливає на родючість ґрунтів та якість їжі?. Екодія. URL: <https://ecoaction.org.ua/vijna-vplyvaie-na-grunty.html> (дата звернення: 09.04.2024).

38. Основні джерела антропогенного забруднення ґрунтів – урок. Біологія, 11 клас. МійКлас. URL: <https://www.miyklas.com.ua/p/biologiya/11-klas/stalii-rozvitok-ta-ratsionalne-prirodokoristuvannia-447189/antropichnii-vpliv-na-grunty-449782/re-793573fa-3884-4d6c-9873-de2b29972a9c> (дата звернення: 09.04.2024).

39. Як російська війна шкодить українським ґрунтам – результати дослідження. Екодія URL: <https://ecoaction.org.ua/grunty-doslidzhennia.html> (дата звернення: 10.04.2024).

40. Вплив воєнних дій на ґрунт. НУБІП URL: <https://nubip.edu.ua/node/121607> (дата звернення: 10.04.2024).

41. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель, С. Чумаченко –

Київ: ГО “Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. – 32 с. (дата звернення: 10.04.2024).

42. Гарасим А., Кельм Н. Шрами війни. Як влаштовані українські окопи на східному фронті (Інфографіка). Texty.org.ua - статті та журналістика даних для людей – Тексти.org.ua. URL: <https://texty.org.ua/articles/101984/vkorani-u-kamin-yak-vlashtovani-ukrayinski-okopy-na-shidnomu-fronti/> (дата звернення: 10.04.2024).

43. Spectral curve shape feature-based hyperspectral remote sensing image retrieval. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/publication/24186852\\_Spectral\\_curve\\_shape\\_feature-based\\_hyperspectral\\_remote\\_sensing\\_image\\_retrieval](https://www.researchgate.net/publication/24186852_Spectral_curve_shape_feature-based_hyperspectral_remote_sensing_image_retrieval) (дата звернення: 22.04.2024).

44. Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review / B. Zhang et al. *Food Research International*. 2014. Vol. 62. P. 326–343. (дата звернення: 22.04.2024).

45. Predicting the anthocyanin content of wine grapes by NIR hyperspectral imaging / S. Chen et al. *Food Chemistry*. 2015. Vol. 172. P. 788–793. (дата звернення: 22.04.2024).

46. PRISMA (Hyperspectral). eoPortal. URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/prisma-hyperspectral> (дата звернення: 20.04.2024).

47. Prisma - EARTH SCIENCE. Agenzia Spaziale Italiana. URL: <https://www.asi.it/en/earth-science/prisma/> (дата звернення: 20.04.2024).

48. The New Hyperspectral Satellite PRISMA: Imagery for Forest Types Discrimination / E. Vangi et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 4. P. 1182. (дата звернення: 20.04.2024).

49. The PRISMA imaging spectroscopy mission: overview and first performance analysis / S. Cogliati et al. *Remote Sensing of Environment*. 2021. Vol. 262. P. 112499. (дата звернення: 20.04.2024).

50. Santini F., Palombo A. Impact of Topographic Correction on PRISMA Sentinel 2 and Landsat 8 Images. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 16. P. 3903. (дата звернення: 20.04.2024).

51. Hybrid retrieval of crop traits from multi-temporal PRISMA hyperspectral imagery / G. Tagliabue et al. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022. Vol. 187. P. 362–377. (дата звернення: 28.04.2024).

52. Hyperspectral remote sensing of fire: State-of-the-art and future perspectives / S. Veraverbeke et al. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 216. P. 105–121. (дата звернення: 28.04.2024).

53. Leonardo Spaceborne Infrared Payloads for Earth Observation: SLSTRs for Copernicus Sentinel 3 and PRISMA Hyperspectral Camera for PRISMA Satellite / P. Coppo et al. *Proceedings*. 2019. Vol. 27, no. 1. P. 1. (дата звернення: 28.04.2024).

54. Pansharping PRISMA Data for Marine Plastic Litter Detection Using Plastic Indexes / M. Kremezi et al. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 61955–61971. (дата звернення: 29.04.2024).

55. Application of New Hyperspectral Sensors in the Remote Sensing of Aquatic Ecosystem Health: Exploiting PRISMA and DESIS for Four Italian Lakes / M. Bresciani et al. *Resources*. 2022. Vol. 11, no. 2. P. 8 (дата звернення: 29.04.2024).

56. Seydi S. T., Hasanlou M., Chanussot J. DSMNN-Net: A Deep Siamese Morphological Neural Network Model for Burned Area Mapping Using Multispectral Sentinel-2 and Hyperspectral PRISMA Images. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 24. P. 5138. (дата звернення: 29.04.2024).

57. CO Meeting Organizer EGU22. *CO Meeting Organizer*. URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-6983.html> (дата звернення: 31.04.2024).

58. Survey of Hyperspectral Earth Observation Applications from Space in the Sentinel-2 Context / J. Transon et al. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, no. 3. P. 157. (дата звернення: 31.04.2024).

59. Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data / J. A. Sobrino et al. *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 102, no. 1-2. P. 99–115. (дата звернення: 28.04.2024).

60. Detection and Classification of Non-Photosynthetic Vegetation from PRISMA Hyperspectral Data in Croplands / M. Pepe et al. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 23. P. 3903. (дата звернення: 03.05.2024).

61. Prisma Hyperspectral Mission Products. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/publication/328990698\\_Prisma\\_Hyperspectral\\_Mission\\_Products](https://www.researchgate.net/publication/328990698_Prisma_Hyperspectral_Mission_Products) (дата звернення: 03.05.2024).

62. The New Hyperspectral Satellite PRISMA: Imagery for Forest Types Discrimination / E. Vangi et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 4. P. 1182. (дата звернення: 09.05.2024).

63. Shaik R. U., Laneve G., Fusilli L. An Automatic Procedure for Forest Fire Fuel Mapping Using Hyperspectral (PRISMA) Imagery: A Semi-Supervised Classification Approach. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 5. P. 1264.

64. ASI-PRISMA Hyperspectral Mission for the Analysis of Geophysical Phenomena. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/publication/355242659\\_ASI-PRISMA\\_Hyperspectral\\_Mission\\_for\\_the\\_Analysis\\_of\\_Geophysical\\_Phenomena](https://www.researchgate.net/publication/355242659_ASI-PRISMA_Hyperspectral_Mission_for_the_Analysis_of_Geophysical_Phenomena) (дата звернення: 10.05.2024).

65. Multispectral Remote Sensing Systems. Discover Penn State. URL: <https://www.e-education.psu.edu/geog480/node/494> (дата звернення: 08.05.2024).