

**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**
« _____ » _____ 2025 р.

**МОНІТОРИНГ СТАНУ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ ЗА ДОПОМОГОЮ
ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ
(НА ПРИКЛАДІ ІЗЮМСЬКИХ ЛІСІВ)
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

Виконав: студентка 4-го курсу д.ф.н,
групи ГК- 41
спеціальність: 106 Географія
освітня програма: Картографія, геоінформатика
і кадастр
Дар'я Віталіївна ПЕРЕЦЬ
Науковий керівник:
доцент, к.геогр.н. Борис ШУЛКА

Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою

Голова ЕК Валентина РЕДІНА

Секретар ЕК Тетяна БУЛГАКОВА
« _____ » _____ 2025р.

Харків – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ГЕОГРАФІЧНЕ ПОЛОЖЕННЯ, ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОСОБЛИВОСТІ ІЗЮМСЬКИХ ЛІСІВ	6
1.1. Загальна інформація про Ізюмські ліси	6
1.2. Військовий вплив на досліджувану територію	8
РОЗДІЛ 2. МОНІТОРИНГ СТАНУ РОСЛИННОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ	12
2.1. Переваги використання супутникових даних для оцінки екологічних наслідків війни в Україні	12
2.2. Спектральні індекси даних дистанційного зондування Землі при вивченні стану навколишнього природного середовища	20
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ІЗЮМСЬКИХ ЛІСІВ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ	34
3.1. Методика для аналізу впливу військових дій на територію лісу з використанням спектральних індексів	34
3.1.1. Аналіз стану лісів за допомогою NDVI	36
3.1.2. Аналіз стану лісів за допомогою NBR	43
3.1.3. Створення та аналіз комплексної карти стану Ізюмських лісів на основі індексів NDVI та NBR	50
3.2. Використання результатів дослідження для перспективи відновлення Ізюмських лісів у майбутньому	53
ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

ВСТУП

Сучасний стан довкілля в Україні зазнав суттєвих трансформацій під впливом воєнних дій, які розгорнулися після повномасштабного вторгнення російської федерації у 2022 році. Однією з найбільш вразливих екосистем у цьому контексті стали ліси – важливі регулятори клімату, джерела біорізноманіття та складові систем життєзабезпечення людини. Масштабні руйнування, пожежі, хімічні забруднення, переміщення важкої техніки – усе це спричинило глибоку екологічну кризу, наслідки якої ще потребують комплексної оцінки.

У цьому контексті надзвичайно актуальними є методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що дозволяють оперативно, наочно та безпечно оцінювати екологічний стан територій навіть у важкодоступних або небезпечних для перебування районах. Одним з найефективніших інструментів у цій галузі є спектральні індекси NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) та NBR (Normalized Burn Ratio), які дозволяють фіксувати зміни у вегетаційному покриві, виявляти наслідки пожеж, вирубок, деградації рослинності.

Використання даних, на основі дистанційного зондування Землі забезпечує високоточне та оперативне отримання інформації про стан рослинного покриву території, де в наш час за безпековими вимогами, немає змоги проводити дослідження традиційними польовими методами.

Актуальність цієї роботи полягає в необхідності оперативної та об'єктивної оцінки екологічної шкоди, заподіяної війною, з метою формування стратегій реабілітації природних екосистем України.

Визначення об'єкта та предмета дослідження.

Об'єктом дослідження цієї роботи є Ізюмські ліси Харківської області – територія, що опинилася в епіцентрі бойових дій, зазнавши значних руйнувань як природного, так і соціального характеру.

Предметом дослідження є аналіз дистанційної цифрової інформації для оцінювання стану та змін рослинного покриву.

Завдяки аналізу супутникових знімків за 2020 та 2024 роки, в роботі зроблено спробу простежити динаміку змін рослинного покриву, оцінити ступінь деградації лісових масивів та окреслити перспективи для їхнього відновлення.

Формулювання мети та завдань дослідження.

Метою дослідження є виявлення масштабів і характеру змін у рослинному покриві Ізюмського лісу внаслідок воєнних дій з використанням даних супутникового моніторингу.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі **основні завдання**:

1. Охарактеризувати теоретичні основи застосування методів ДЗЗ для оцінки стану рослинності.
2. Ознайомитися з основними спектральними індексами та принципами їх застосування.
3. Зібрати супутникові знімки для території Ізюмських лісів за два часові періоди, та здійснити аналіз NDVI та NBR індексів.
4. Створити карту змін рослинного покриву, та інтерпретувати результати сформулювавши рекомендації щодо лісовідновлення.

Методологія дослідження. Під час написання роботи використовувалися наступні методи: метод обробки літературних джерел (проведено огляд наукових публікацій); метод обробки даних ДЗЗ (дозволяє дослідити, проаналізувати та спрогнозувати стан рослинного покриву в межах досліджуваної території, де не можливе традиційне польове проведення досліджень); метод аналізу (дозволяє розкрити понятійно-термінологічний апарат дослідження); картографічний метод (дозволяє візуалізувати отримані дані включали використання спеціалізованого програмного забезпечення для обробки геопросторових даних (GIS-системи).

Структура та обсяг дипломної роботи. Загальний обсяг роботи дорівнює 62 сторінки, складається з вступу, 3 розділів, висновку. Кваліфікаційна робота включає 30 рисунків, 1 таблицю. Список джерел містить 53 одиниці літератури.

Апробація результатів роботи була проведена на двох щорічних наукових конференціях студентів та аспірантів кафедри фізичної географії та картографії факультету геології, географії, рекреації і туризму «Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи», присвячених пам'яті професора Г. П. Дубинського, а саме за 2023 (13 квітня, випуск №15) та 2025 роки (10 квітня, випуск №17) [8, 9].

РОЗДІЛ 1. ГЕОГРАФІЧНЕ ПОЛОЖЕННЯ, ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОСОБЛИВОСТІ ІЗЮМСЬКИХ ЛІСІВ

1.1. Загальна інформація про Ізюмські ліси

Ізюмська територіальна громада розташована на лівобережжі річки Балка, яка є притокою Сіверського Дінця. Загальна площа громади становить 37 607,2 га, адміністративним центром є місто Ізюм. До складу громади входять 16 населених пунктів, розташованих у межах природної зони Лісостепу, що формує сприятливі умови для розвитку лісового господарства та сільського землекористування.

Одним із ключових природних і економічних ресурсів громади є ліси, які обслуговуються державним підприємством «Ізюмське лісове господарство». Це підприємство є одним із найбільших у Харківській області й належить до провідних лісогосподарських установ Лівобережної України. Його площа охоплює 53 036 га. Офіційна дата заснування Ізюмського лісгоспу – 1 жовтня 1929 року, однак фактично він сформувався шляхом об'єднання трьох лісогосподарських структур: Ізюмського, Святогірського та Балаклійського лісгоспів. Загальна територія була розділена на 10 лісництв, кожне з яких відповідало за окрему ділянку лісового фонду [12].

Цей великий лісовий масив займає території по правому берегу річки Сіверський Донець і є частиною Лівобережного Лісостепу – фізико-географічної зони, яка поєднує риси як лісових, так і степових екосистем. Рельєф місцевості переважно рівнинний, з характерними піщаними терасами, дюнами та заплавами долинами, а ґрунтовий покрив складається переважно з дерново-піщаних і супіщаних ґрунтів. Це сприяє формуванню борів, у яких переважає сосна звичайна.

Клімат регіону є помірно-континентальним: середня температура липня становить +20...+22 °С, а січня - -4...-6 °С. Річна кількість опадів коливається в

межах 450-550 мм. Такі погодні умови сприяють формуванню флористично багатих лісів, однак водночас підвищують ризики пожеж, особливо у посушливі періоди [12].

Рослинний світ Ізюмського лісу є досить різноманітним. Основу лісового покриву складають сосна звичайна, дуб черешчатий, береза повисла, липа серцелиста, осика, клен. Підлісок представлений ліщиною, крушиною, глодом, а в трав'яному покриві трапляється велика кількість злакових і лучних видів. Унікальною рисою лісу є поєднання лісової та степової флори, зокрема трапляються ковила, шавлія, костриця. У лісі ростуть рідкісні рослини, занесені до Червоної книги України, такі як зозулинець шоломоносний, сон великий, підсніжник білосніжний.

Фауна Ізюмського бору також є багатогою та репрезентативною для лісостепової зони. Тут мешкають кабани, козулі, борсуки, лисиці, зайці, куниці. Серед птахів трапляються сови, дятли, шуліки, канюки, жайворонки. Присутні численні види плазунів і земноводних, зокрема гадюка звичайна, вуж, зелена жаба. Комахи представлені багатьма видами метеликів, жуків, частина з яких також є охоронюваними.

Частина Ізюмського лісу має природоохоронний статус – на його території створено лісові заказники, ботанічні пам'ятки природи, а також зберігаються окремі вікові дерева (рис. 1). До війни тут здійснювалися планові лісогосподарські заходи – санітарні рубки, лісовідновлення, ведення мисливського господарства. Ліс також мав історичне значення – у його межах і поблизу збереглися залишки козацьких укріплень та пам'ятки періоду Другої світової війни, зокрема пов'язані з Ізюм-Барвінківською операцією.

До початку повномасштабної війни основні напрями діяльності лісгоспу охоплювали широкий спектр завдань: лісівництво, догляд за молодими насадженнями, вирощування багаторічних деревних культур, заготівлю деревини, переробку деревини на лісопильних та стругальних підприємствах, а також оптову торгівлю деревиною, будівельними матеріалами та обладнанням.

Лісгосп також виконував допоміжні функції у сфері збереження природного середовища, охорони лісів від шкідників та хвороб, ведення мисливського господарства та реалізації програм сталого лісокористування.



Рис. 1. План-схема лісу Ізюмського району [18]

1.2. Військовий вплив на досліджувану територію

З 24 лютого 2022 року, внаслідок повномасштабного військового вторгнення Російської Федерації, підприємство «Ізюмське лісове господарство» фактично припинило свою діяльність. Протягом майже півроку Ізюмська громада перебувала під окупацією, що призвело до масштабних руйнувань інфраструктури, значних людських втрат та колосальної шкоди для довкілля. Ліси громади стали місцем активних бойових дій, що супроводжувалися артилерійськими обстрілами, авіаударами, пересуванням важкої техніки та будівництвом військових укріплень.

Як наслідок, лісові екосистеми зазнали серйозних механічних пошкоджень. Важка техніка руйнувала ґрунтовий покрив, обстріли викликали

лісові пожежі, а самовільні вирубки деревини на воєнні потреби спричинили втрату цінних деревостанів. Особливо інтенсивне пошкодження лісів фіксувалося в період з 6 по 8 травня 2022 року, коли внаслідок масштабних пожеж було знищено або пошкоджено значну частину лісового фонду [3]. За експертними оцінками, на окремих ділянках лісу площею 10 га втрати зелених насаджень сягали від 1% до 30% [5].

Такі зміни суттєво вплинули на екологічний потенціал території. Пошкодження лісових масивів призвели до деградації ґрунтів, порушення їхньої структури та зміни фізико-хімічних властивостей. Це, у свою чергу, зменшує здатність ґрунтів забезпечувати ключові екосистемні послуги: очищення води, фільтрацію повітря, акумулювання та утримання вуглецю, продукування деревини, підтримання біорізноманіття, опилення сільськогосподарських культур та виконання рекреаційних функцій. Зокрема, в умовах сучасної кліматичної кризи функція зберігання вуглецю в лісових екосистемах є критично важливою для пом'якшення змін клімату [2].

Війна значно порушила природний баланс фауни в Ізюмських лісах. Інтенсивні бойові дії, що супроводжувалися артилерійськими обстрілами, бомбардуваннями, пересуванням важкої техніки та підривами, спричинили стресові умови для більшості представників тваринного світу. Шум від вибухів і постійне потрясіння лісового середовища змусили багатьох тварин залишити свої традиційні місця існування. Особливо чутливими до таких змін виявилися ссавці, птахи та земноводні, для яких стабільність середовища має вирішальне значення [37].

Через руйнування екосистем, спалювання лісів, знищення чагарників і зниження кількості кормової бази багато видів втратили свої ареали або були змушені мігрувати в інші, більш безпечні місця [33]. Є випадки загибелі тварин як внаслідок прямих обстрілів, так і через контакт із мінами або уламками вибухових пристроїв. Такі фактори стали причиною зниження чисельності окремих популяцій, а в деяких випадках – повного зникнення тварин із певних

ділянок [29].

Разом із тим, іронічним наслідком обмеженого доступу людини до замінованих або небезпечних ділянок стало утворення так званих «зон спокою». У цих районах, де відсутній людський вплив, тварини почали повертатися або залишатися, якщо умови дозволяли. Такі зони тимчасово виконують роль резерватів, але залишаються дуже вразливими через нестабільність ситуації та ризику від залишків боєприпасів.

Ще одним серйозним наслідком військових дій стало забруднення водних ресурсів на території Ізюмських лісів. Унаслідок численних вибухів, підпалів, розливів паливно-мастильних матеріалів, пошкодження техніки та боєприпасів у водні об'єкти потрапляють токсичні речовини. Серед них – важкі метали (свинець, мідь, кадмій), залишки вибухових речовин, паливо та інші шкідливі сполуки, що можуть проникати в поверхневі й підземні води [35].

Забруднення струмків, річок і джерел не лише погіршує якість води, але й прямо загрожує живим організмам, що населяють водні екосистеми. Деякі види риб, земноводних і водних безхребетних мають низьку толерантність до змін хімічного складу води й гинуть або втрачають здатність до розмноження. Крім того, токсичні речовини накопичуються в ланцюгах живлення, що загрожує й наземним видам, які споживають заражену воду або їжу [24].

Для людей, які проживають поблизу, подібне забруднення створює ризику отруєння, зниження якості питної води, підвищення рівня захворюваності та втрати доступу до безпечних водних джерел. Особливу небезпеку становить проникнення шкідливих речовин у водоносні горизонти, що може зробити проблему довготривалою і складною для розв'язання без спеціалізованих систем очищення та моніторингу.

Окрім цього, значна частина лісових площ нині становить потенційну небезпеку для людей через можливе мінування, наявність нерозірваних боєприпасів, залишків пального, нафтопродуктів та інших токсичних речовин. Це не лише загрожує життю та здоров'ю місцевого населення й працівників

лісового господарства, але й створює додаткові бар'єри для проведення відновлювальних робіт і екологічного моніторингу.

Таким чином, Ізюмська громада сьогодні стоїть перед складним викликом відновлення лісового фонду, екологічної стабільності та економічної активності. Для цього необхідно провести ретельну екологічну інвентаризацію, розмінування територій, залучення фахівців до оцінки стану пошкоджених екосистем, використання сучасних супутникових та геоінформаційних технологій (рис. 2) для моніторингу змін, а також розробити довгострокову стратегію лісовідновлення з урахуванням екологічних, економічних і соціальних чинників.

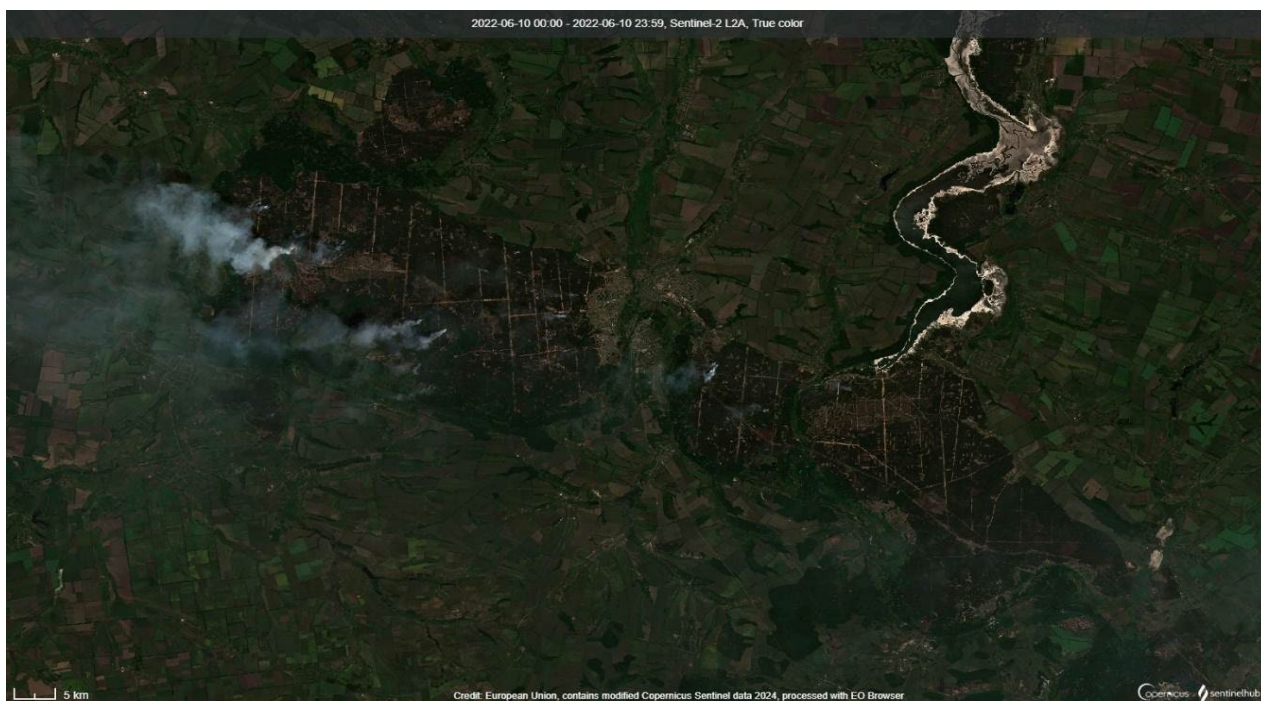


Рис. 2. Пожежі в Ізюмських лісах у червні 2022 року [44]

РОЗДІЛ 2. МОНІТОРИНГ СТАНУ РОСЛИННОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

2.1. Переваги використання супутникових даних для оцінки екологічних наслідків війни в Україні

Збройні конфлікти спричиняють не лише соціальні та економічні втрати, а й серйозні екологічні наслідки, які часто залишаються непомітними на перший погляд, проте мають довготривалий вплив на довкілля та якість життя людей. Війна – це не лише руйнування інфраструктури, втрата життів і переміщення населення, а й глибокий слід у навколишньому середовищі, що може тягнутися десятиліттями.

В контексті війни в Україні, яка триває з 2014 року і значно загострилася після повномасштабного вторгнення у 2022 році, спостерігається безпрецедентний рівень екологічного спустошення. За офіційними даними, понад 1,24 мільйона гектарів природоохоронних територій зазнали ушкоджень [16]. Це більше третини всього природно-заповідного фонду країни. Крім того, понад 44% найцінніших природних територій, включно з національними парками, заказниками, заповідниками та іншими об'єктами з унікальним біорізноманіттям, опинилися в зоні активних бойових дій або під окупацією [5, 36].

Військові дії супроводжуються використанням важкої техніки, артилерійськими обстрілами, авіаударами, підривами інфраструктури, що завдає непоправної шкоди екосистемам [46]. У багатьох випадках окупаційні війська вели бойові дії без жодного врахування природоохоронного законодавства: вони рили окопи безпосередньо в заповідних зонах (рис. 3), прокладали дороги та будували фортифікаційні споруди, засмічували території відходами, а також залишали після себе міни, які становлять загрозу не лише для людей, а й для диких тварин [11]. Мінування територій призводить до того, що багато видів

фауни втрачають свої природні середовища існування, а флора зазнає механічного ушкодження або повністю знищується [47].

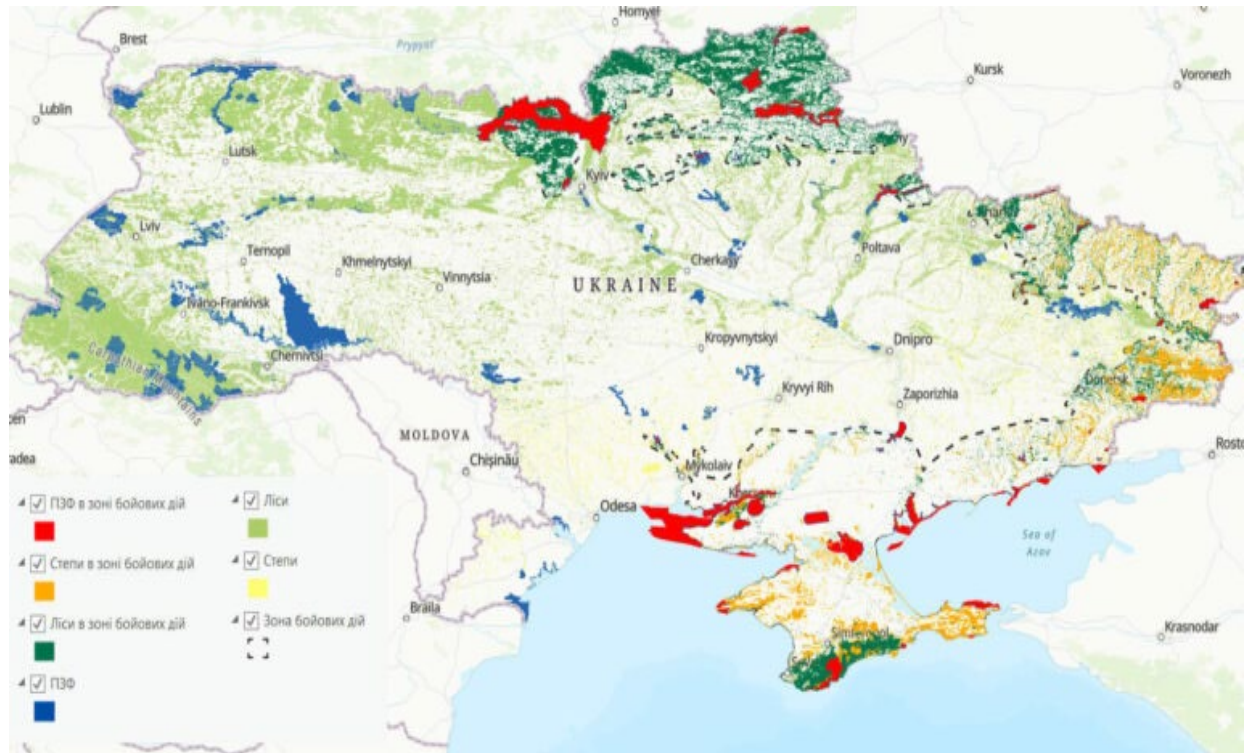


Рис. 3. Візуалізація постраждалих природних територій, внаслідок військового вторгнення за даними ГО “Українська природоохоронна група” [1, 19]

Окрему проблему становить забруднення ґрунтів і водних ресурсів. Під час бойових дій у ґрунт і воду потрапляють важкі метали, нафтопродукти, залишки вибухових речовин і токсичних компонентів від зруйнованої техніки [49]. Це отруєє не лише природу, а й створює ризики для здоров’я населення, яке може користуватися забрудненими водними джерелами або вирощувати продукти на отруєній землі [14]. Рівень небезпеки збільшується у випадку пошкодження промислових об’єктів, таких як хімічні заводи або склади з добривами, що можуть спричинити масштабні витіки токсичних речовин. [4]

Ще одним важливим аспектом є людський фактор – в умовах війни порушено роботу численних природоохоронних структур. Багато інспекторів, екологів, науковців змушені були евакуюватися або не мають змоги здійснювати контроль за станом довкілля. Це призвело до призупинення або навіть повного

знищення довготривалих програм зі збереження біорізноманіття, моніторингу рідкісних видів, відновлення екосистем. Без належного нагляду охоронювані території перетворюються на зони ризику, в яких відновлення природної рівноваги може тривати десятиліттями [42].

У сучасних умовах війни супутникові технології стали незамінним інструментом для моніторингу стану навколишнього середовища. Завдяки супутниковим знімкам і аналітичним платформам стало можливим оперативно виявляти зміни в природному середовищі, фіксувати вирубку лісів, знищення степових ділянок, забруднення водойм і зниження рослинності [15]. Супутникові дані дозволяють створювати карти екологічного спустошення, оцінювати масштаби деградації ландшафтів і формувати докази для притягнення винних до відповідальності в майбутньому. Через повномасштабне вторгнення було пошкоджено понад третину природно-заповідного фонду, а багато регіонів стали небезпечними або недоступними для проведення польових досліджень [39]. У таких умовах супутникові знімки стали одним з головних джерел достовірної екологічної інформації.

Однією з основних переваг використання супутникових даних є можливість охоплення великих територій незалежно від їхнього розташування та ступеня доступності. Супутники спостерігають за поверхнею Землі з орбіти, тому не обмежені фізичними бар'єрами або небезпеками, які часто супроводжують воєнні конфлікти. Завдяки цьому стає можливим дослідження територій, що знаходяться в зоні бойових дій, замінованих місцевостях або в окупації. Це дозволяє отримувати цілісну картину екологічного стану країни навіть у найскладніших обставинах.

Сучасні супутникові системи забезпечують високу просторову та часову роздільність. Це означає, що за допомогою супутників можна не лише зафіксувати масштаби руйнувань, але й побачити деталі: воронки від снарядів, окопи, знищену лісову або сільськогосподарську рослинність, розливи нафтопродуктів. Часте оновлення знімків – щодня або щотижня залежно від

супутника – дає змогу відстежувати зміни у режимі майже реального часу (рис. 4). Це особливо корисно для аналізу динаміки екологічних процесів: поширення лісових пожеж, підтоплень, вирубки лісів чи пошкодження природоохоронних об'єктів.

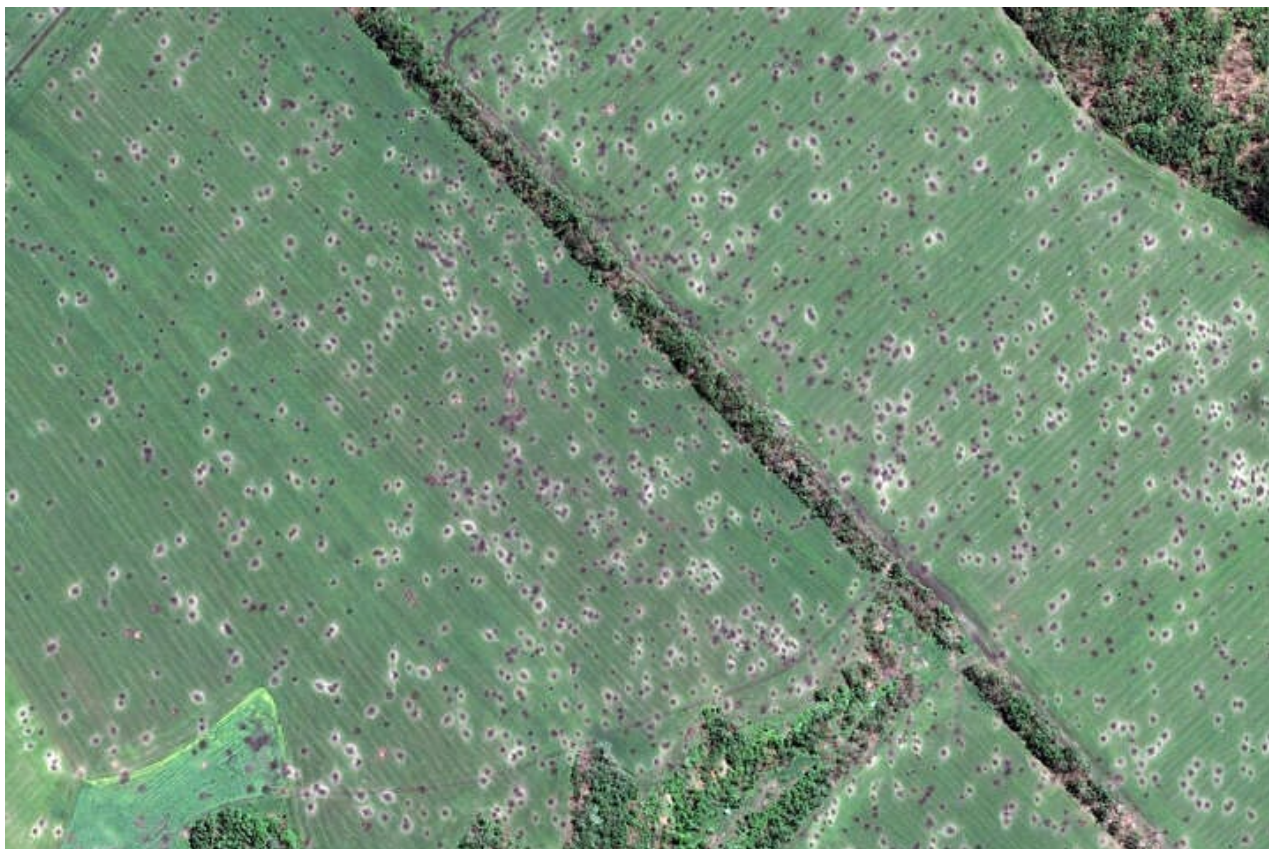


Рис. 4. Українська земля вкрита вирвами від російських снарядів [21]

На основі супутникових даних створюються динамічні карти, які фіксують просторові й часові зміни природного середовища. Вони відображають екологічну ситуацію до, під час і після бойових дій, що дозволяє точно визначити масштаб завданої шкоди. Такі карти можуть відображати рівень забруднення повітря, води та ґрунтів, площу зруйнованих екосистем, місця знищення лісів, болот або пасовищ. Дані використовуються не лише науковцями, а й державними установами, громадськими організаціями та міжнародними партнерами для розробки заходів з відновлення природи та фіксації екологічних злочинів.

Крім того, дистанційне зондування дозволяє уникнути значних ризиків для

життя та здоров'я дослідників. У зонах активних бойових дій польові експедиції можуть бути смертельно небезпечними через вибухонебезпечні предмети, обстріли або нестабільну ситуацію. Використання супутників усуває потребу в фізичній присутності на місці дослідження, що не лише зберігає життя людей, а й забезпечує безперервність екологічного моніторингу в кризових умовах.

Ще однією вагомою перевагою є економічна ефективність супутникових спостережень. Наземні дослідження потребують значних ресурсів – транспорту, спеціалістів, обладнання, часу. Супутникові дані дозволяють швидко отримувати інформацію з великих територій із мінімальними витратами. Завдяки автоматизованим алгоритмам та використанню штучного інтелекту обробка даних відбувається швидко, а результати можна одразу застосовувати для планування, реагування або звітування.

Важливо також зазначити, що супутникові дані легко інтегруються з іншими цифровими інструментами, такими як геоінформаційні системи (ГІС), цифрові карти, бази екологічного моніторингу. Така інтеграція дозволяє глибше аналізувати інформацію, виявляти закономірності, будувати моделі впливу війни на природу та прогнозувати подальші зміни. Це підвищує якість прийняття рішень щодо природоохоронної політики, планування відновлення та захисту екосистем.

На сході України, зокрема у Донецькій та Луганській областях, великі площі лісів згоріли внаслідок пожеж, викликаних артилерійськими та авіаційними обстрілами. Ці втрати чітко простежуються за зниженням індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), що використовується для оцінки щільності та стану рослинного покриву. Зменшення значень NDVI свідчить про вигорання рослинності або її механічне знищення. Таким чином, супутникові дані дають змогу швидко і масштабно оцінити втрати зелених зон [7].

Пошкодження природних екосистем веде до різкого скорочення чисельності видів рослин і тварин, порушення харчових ланцюгів та вимирання локальних популяцій. Зникнення природного середовища проживання через

вибухи та пожежі змушує диких тварин мігрувати або гине внаслідок стресу та втрати кормових ресурсів [28].

Серйозною проблемою є також забруднення ґрунтів нафтопродуктами, хімічними речовинами, важкими металами та залишками боєприпасів. [26] Військова техніка, обстріли складів пального, підриви інфраструктурних об'єктів створюють численні джерела токсичних забруднень. За допомогою супутникових знімків з високою спектральною роздільністю можна виявляти такі осередки – завдяки зміні спектральних характеристик поверхні, які відрізняються від нормального стану рослинності чи ґрунту. Зокрема, уражені території часто демонструють інші відбиття у ближньому інфрачервоному або короткохвильовому інфрачервоному діапазоні [31].

Руйнування водогосподарських споруд, зокрема дамб і водосховищ (рис. 5), має ще один потужний негативний ефект [25]. Яскравим прикладом є підрив Каховської гідроелектростанції, який призвів до стрімкої деградації навколишніх водних екосистем. Після цієї катастрофи відбулося швидке обміління великої території, зникнення численних водно-болотних угідь, загибель водної флори й фауни [32]. Супутникові системи зафіксували значні зміни в береговій лінії, зменшення площі затоплених територій, підвищення каламутності води, що видно через аналіз оптичних і спектральних даних [53].

Крім цього, переміщення важкої військової техніки, обстріли сільськогосподарських земель і вибухи на полях призводять до порушення ґрунтового покриву й активізації процесів ерозії [51]. Це спричиняє втрату родючого шару ґрунту, ускладнення вирощування культур у майбутньому та зміну ландшафту. Такі зміни добре видно на радарних (радіолокаційних) супутникових знімках, які дозволяють виявити зміни текстури поверхні навіть за хмарної погоди або вночі.

Окрему небезпеку становлять обстріли промислових підприємств і складів хімічних речовин. Унаслідок таких ударів часто виникають масштабні пожежі, які супроводжуються викидами отруйних речовин у повітря [30]. Супутникові

системи нового покоління, зокрема Sentinel-5P (рис. 6), обладнані інструментами для вимірювання концентрацій різних атмосферних забруднювачів. Ці супутники дозволяють фіксувати збільшення рівнів діоксиду сірки, чадного газу, формальдегіду та інших шкідливих компонентів, що свідчить про виникнення екологічно небезпечних ситуацій.



Рис. 5. Космічний знімок підриву Каховської ГЕС [17]



Рис. 6. Супутникова система Sentinel-5P [43]

Супутникові технології мають значний потенціал для покращення системи екологічного моніторингу, особливо в умовах воєнного конфлікту, коли традиційні методи дослідження стають небезпечними або неможливими. Подальше розширення їх використання відкриває нові горизонти у вивченні впливу війни на навколишнє середовище. Насамперед, це дозволяє підвищити точність у фіксації екологічних змін, що виникають під час або після військових дій. Завдяки високій просторовій та спектральній роздільності сучасних супутників можна виявляти навіть незначні відхилення у стані природних об'єктів, такі як деградація ґрунту, зміни рослинності чи забруднення вод [23].

Окрім того, постійне накопичення супутникових спостережень створює основу для побудови моделей довготривалого аналізу та прогнозування. Такі моделі дозволяють відстежувати тенденції змін у навколишньому середовищі, виявляти потенційні загрози, планувати заходи з реабілітації екосистем та розробляти національні або регіональні стратегії з відновлення природного середовища. Це особливо важливо в умовах післявоєнної відбудови, коли необхідно не просто зафіксувати факт руйнувань, а й забезпечити сталий підхід до екологічного відновлення.

Втім, попри велику кількість переваг, використання супутникових технологій супроводжується низкою викликів та обмежень, які варто враховувати. По-перше, якісні супутникові знімки з високою роздільністю не завжди доступні безкоштовно. Комерційні супутники, які забезпечують детальні зображення (до 30 см на піксель), вимагають значних фінансових витрат на придбання даних. Це може стати серйозною перешкодою для державних структур, наукових установ або громадських організацій, особливо в умовах обмежених бюджетів під час війни.

По-друге, для ефективного використання супутникових знімків потрібне спеціалізоване програмне забезпечення для обробки та аналізу даних. Це можуть бути геоінформаційні системи, системи обробки дистанційного зондування, машинного навчання тощо. Установлення такого програмного забезпечення, а

також навчання персоналу, потребує часу, ресурсів і технічної підтримки.

Ще одним технічним обмеженням є вплив погодних умов на якість отриманих супутникових зображень. Оптичні супутники не можуть "бачити" крізь хмари, туман чи дим, тому в періоди тривалих несприятливих атмосферних умов – зокрема в осінньо-зимовий період – якість знімків може суттєво знижуватись або взагалі бути непридатною до аналізу. У таких випадках використовують радіолокаційні супутники, які працюють у мікрохвильовому діапазоні та здатні "просвічувати" хмарність, однак такі системи є складнішими в обробці та часто, теж платні.

Таким чином, хоча супутникові дані надають унікальні можливості для дослідження і оцінки екологічних наслідків війни, для їх повноцінного використання необхідно враховувати технічні, фінансові та кадрові обмеження. Подолання цих викликів потребує розвитку національної інфраструктури моніторингу, міжнародної співпраці, інвестицій у науку й освіту, а також створення умов для широкого доступу до відкритих екологічних даних. Тільки в такому випадку супутникові технології зможуть максимально ефективно працювати на благо довкілля та сталого майбутнього.

2.2. Спектральні індекси даних дистанційного зондування Землі при вивченні стану навколишнього природного середовища

Одним із ключових досягнень у розвитку технологій дистанційного зондування Землі стало відкриття та активне впровадження спектральних індексів. Це стало справжнім проривом у способах аналізу даних, отриманих із супутників. На ранніх етапах розвитку цієї галузі фахівці дійшли висновку, що аналіз зображень у межах окремих спектральних діапазонів (наприклад, лише у видимому або інфрачервоному світлі) не завжди є достатнім для точної оцінки об'єктів на поверхні Землі. Значно більше інформації можна отримати, досліджуючи співвідношення між відбиттям світла у різних діапазонах спектра.

Саме на цій основі були розроблені спектральні індекси – числові показники, які обчислюються шляхом порівняння рівнів відбиття сонячного випромінювання у двох або більше каналах супутникової зйомки. Зазвичай для цього використовуються певні математичні операції, такі як різниця, відношення або їх комбінація. Отримані значення дозволяють виявляти та кількісно оцінювати зміни в стані природного середовища, особливо рослинного покриву.

Особливе значення мають так звані вегетаційні індекси (ВІ) – спеціалізовані спектральні показники (рис. 7), призначені для оцінки стану, густоти та активності рослинного покриву. Їх значення безпосередньо пов'язані з біофізичними властивостями рослин, такими як вміст хлорофілу, площа листової поверхні, густина та рівень фотосинтетичної активності. Рослини, що активно розвиваються, мають характерне поєднання спектральних відбиттів: вони сильно поглинають червоне світло (RED) через хлорофіл, але водночас активно відбивають ближнє інфрачервоне випромінювання (NIR), що зумовлено структурою листка. Таким чином, зміни у стані рослинності призводять до змін у співвідношенні між RED і NIR, що і фіксують вегетаційні індекси [22].

На сьогодні науковці та фахівці у сфері дистанційного моніторингу розробили понад 150 вегетаційних індексів. Кожен із них має свою специфіку та призначення: деякі краще підходять для аналізу культурних рослин, інші – для моніторингу лісів або вологих екосистем, ще інші – для виявлення деградації земель або оцінки стресу у рослинності [20]. Однак, незважаючи на таку велику кількість, на практиці активно застосовується лише обмежене число індексів, які показали свою ефективність у вирішенні конкретних задач [50].

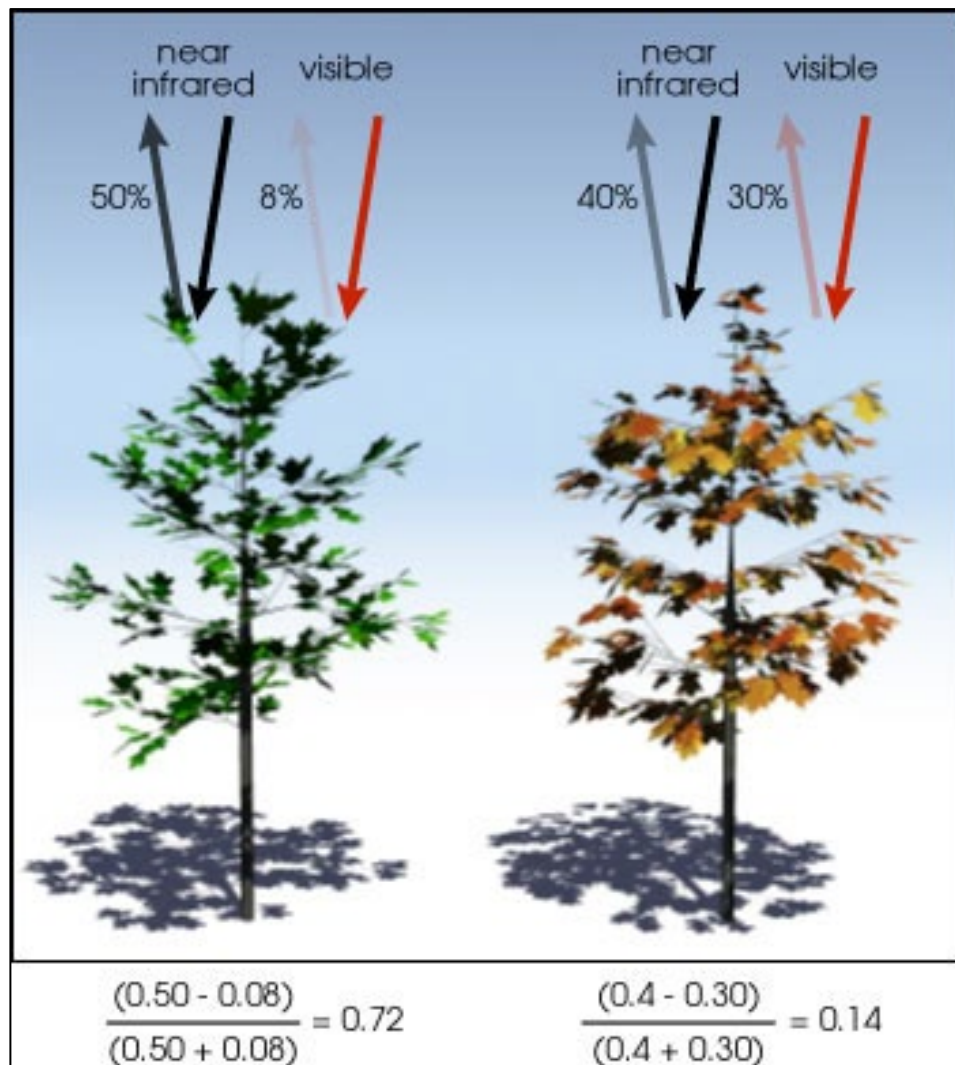


Рис. 7. Принцип роботи вегетаційних індексів [6]

Це створює потребу в ретельному виборі відповідного індексу залежно від завдань дослідження (рис. 8). Наприклад, для моніторингу посух доцільно використовувати індекси, чутливі до вологи в рослинах (як-от NDWI), тоді як для картування щільності лісів – NDVI або EVI (Enhanced Vegetation Index). Таким чином, правильний вибір індексу є вирішальним фактором для отримання достовірної та науково обґрунтованої інформації про стан рослинності та її зміни.

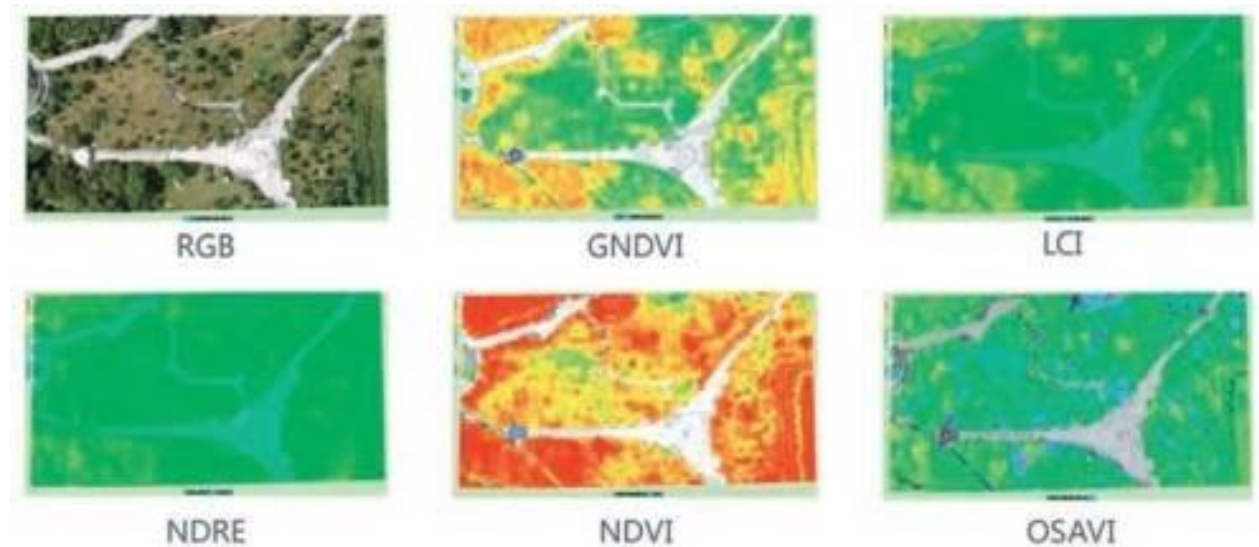


Рис. 8. Приклади індексів розвитку рослин [13]

Одним із найпоширеніших та найбільш ефективних методів аналізу стану рослинності за допомогою дистанційного зондування Землі є використання нормалізованого вегетаційного індексу різниці – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Цей індекс є надійним інструментом для виявлення наявності та оцінки щільності зеленої живої рослинності, що робить його надзвичайно корисним у галузях сільського господарства, лісового господарства, екологічного моніторингу та управління природними ресурсами. Він заснований на простій математичній формулі:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

де NIR – це відбите випромінювання у ближньому інфрачервоному діапазоні, а RED – у червоному діапазоні. Активно зростаючі рослини інтенсивно поглинають червоне світло та, навпаки, сильно відбивають інфрачервоне, тому у здорових ділянок рослинності індекс наближається до +1. Натомість мертва або деградована рослинність, голий ґрунт, урбанізовані території чи водні поверхні мають значення, близькі до нуля або навіть від’ємні [38].

Значення NDVI коливається в межах від -1 до +1. Позитивні значення

(особливо в межах 0.3-0.8) свідчать про здорову та щільну зелену рослинність, тоді як значення близькі до нуля – можуть вказувати на оголений ґрунт або території з рідкою або пошкодженою рослинністю. Від’ємні значення зазвичай відповідають водним об’єктам, сніговому покриву або штучним покриттям. У результаті такого розрахунку стає можливим швидко і ефективно картографувати великі території, виявляючи зони активної вегетації та ті, що зазнали змін або деградації.

Відповідно до цієї формули щільність рослинності (NDVI) в певній точці зображення дорівнює різниці інтенсивностей відбитого світла в червоному та інфрачервоному діапазонах, поділеній на суму їх інтенсивностей. Алгоритм розрахунку NDVI вбудований практично в усі поширені пакети програмного забезпечення, пов’язані з обробкою даних дистанційного зондування, і використовує набір каналів інфрачервоного та червоного спектрів, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Комбінації каналів знімальних систем супутників, що використовуються для розрахунку індексу NDVI [38]

Тип сенсора	Канали, що використовуються для обчислення NDVI
TM Landsat (4,5)	3 (0,63–0,69 мкм), 4 (0,76–0,90 мкм)
ETM+ Landsat 7	3 (0,63–0,69 мкм), 4 (0,75–0,90 мкм)
OLI Landsat 8	4 (0,63–0,67 мкм), 5 (0,85–0,88 мкм)

У практиці дистанційного зондування NDVI використовується для багатьох цілей. Наприклад, у сільському господарстві цей індекс дозволяє визначати зони, де культури знаходяться у стресовому стані через нестачу вологи, хвороби або дефіцит поживних речовин. У лісовому господарстві NDVI застосовують для оцінки щільності лісового покриву, виявлення вирубок, зон пожеж або відновлення лісів. Крім того, цей індекс широко використовується в дослідженнях кліматичних змін, деградації земель, опустелювання та інших

екологічних процесів.

Особливу роль NDVI відіграє в умовах війни, оскільки дозволяє оцінити масштаб впливу бойових дій на природне середовище, зокрема на рослинний покрив. Для цього аналізуються супутникові зображення високої просторової роздільності, отримані до та після активних бойових дій. Найбільш поширеними джерелами таких даних є супутники Landsat (USGS), Sentinel-2 (ESA) та MODIS (NASA). Застосування даних за два часових періоди дозволяє створити порівняльні карти, які чітко відображають зони деградації або відновлення. Це особливо актуально для територій, що постраждали від артилерійських обстрілів, пожеж, проходження важкої техніки чи інженерних робіт, пов'язаних із війною.

Обробка зображень для розрахунку NDVI здійснюється в сучасних геоінформаційних системах, таких як QGIS, ArcGIS або онлайн-платформах, наприклад Google Earth Engine. Ці системи дозволяють автоматизувати розрахунок індексу, виконувати візуалізацію результатів у вигляді карт, а також здійснювати просторову аналітику. Для підвищення точності результатів необхідно враховувати сезонні зміни рослинності, метеорологічні умови та антропогенні впливи. У складних випадках також можуть застосовуватись алгоритми машинного навчання, що дозволяють автоматично класифікувати зони за рівнем деградації або відновлення. Поєднання цього індексу з додатковими даними, такими як карти пожеж, маршрути військової техніки, топографічні особливості та дані про ґрунтовий покрив, дозволяє отримати повну картину екологічного стану територій. Такі комплексні підходи є основою для розробки стратегій екологічного відновлення, реабілітації лісів, підвищення стійкості природних екосистем до майбутніх викликів [38].

Завдяки простоті, доступності та високій ефективності NDVI став основою для екологічного моніторингу не лише науковцями, а й урядовими структурами, екологічними організаціями та сільськогосподарськими підприємствами по всьому світу. Зокрема, платформи точного землеробства, такі як EOSDA Crop

Monitoring, активно використовують NDVI для оптимізації внесення добрив, контролю зрошення та виявлення проблемних зон на полях. У глобальному контексті NDVI також використовується для спостереження за змінами в екосистемах, розширенням пустель, впливом кліматичних змін, що робить його незамінним інструментом сталого управління природними ресурсами (рис. 9).

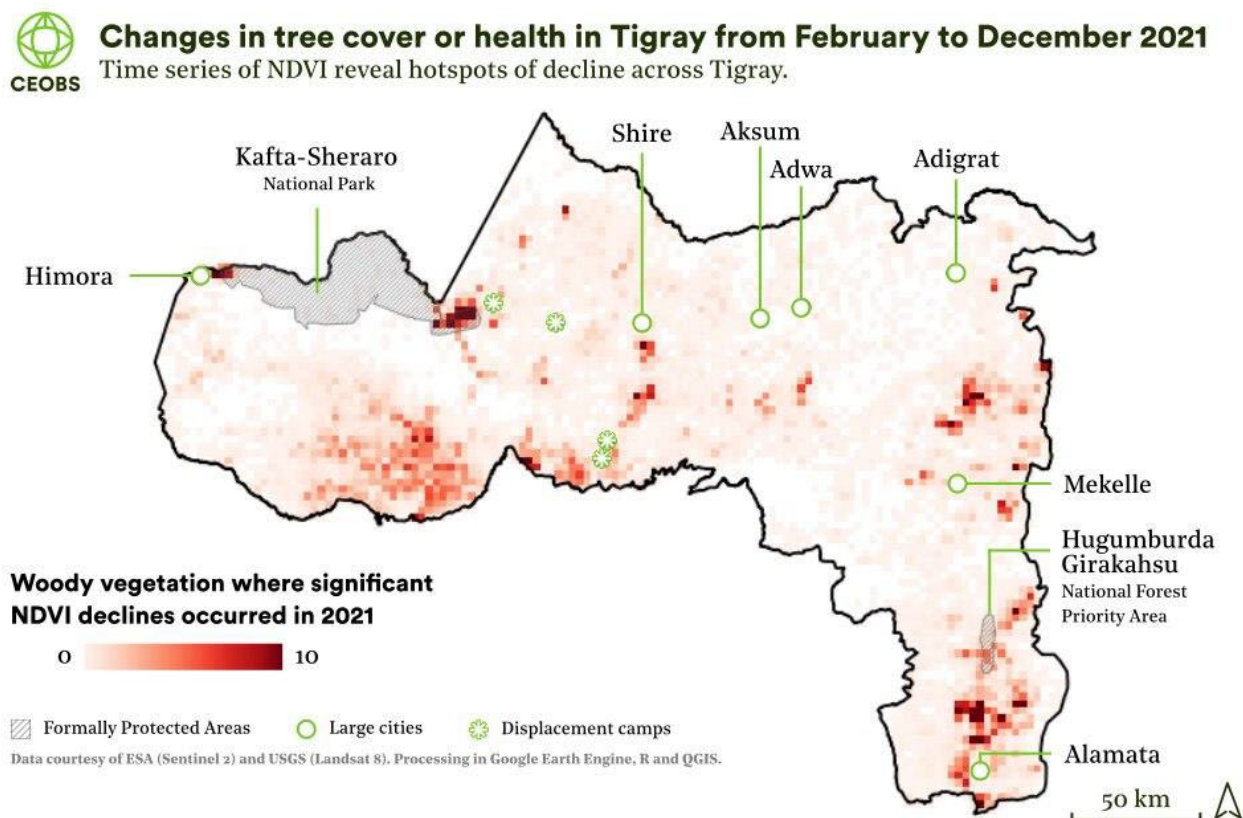


Рис. 9. Вплив війни на деревну рослинність на території регіону Тиграї, проаналізований за допомогою NDVI [34]

Для виявлення та оцінки наслідків пожеж на природних територіях широко застосовується нормалізований індекс вигорілих ділянок – NBR (Normalized Burn Ratio). Цей спектральний індекс дозволяє ефективно визначати ступінь пошкодження рослинного покриву, що виник внаслідок дії вогню, а також просторово локалізувати зони, які зазнали найбільшої деградації.

Принцип дії індексу NBR ґрунтується на аналізі співвідношення відбитого електромагнітного випромінювання у двох важливих спектральних діапазонах –

ближньому інфрачервоному (NIR) та середньому інфрачервоному (SWIR). Ці діапазони були обрані не випадково, адже саме вони є найбільш чутливими до змін у структурі та стані рослинного покриву. Зокрема, канал ближнього інфрачервоного спектра (NIR) фіксує стан листя та інтенсивність рослинного покриву: здорова вегетація відбиває значну частину NIR-випромінювання. У свою чергу, канал середнього інфрачервоного спектра (SWIR) є чутливим до вологості поверхні – після пожежі волога випаровується, а значення відбиття в SWIR-діапазоні зростає, що дозволяє точно виявляти зони вигорання (рис. 10).

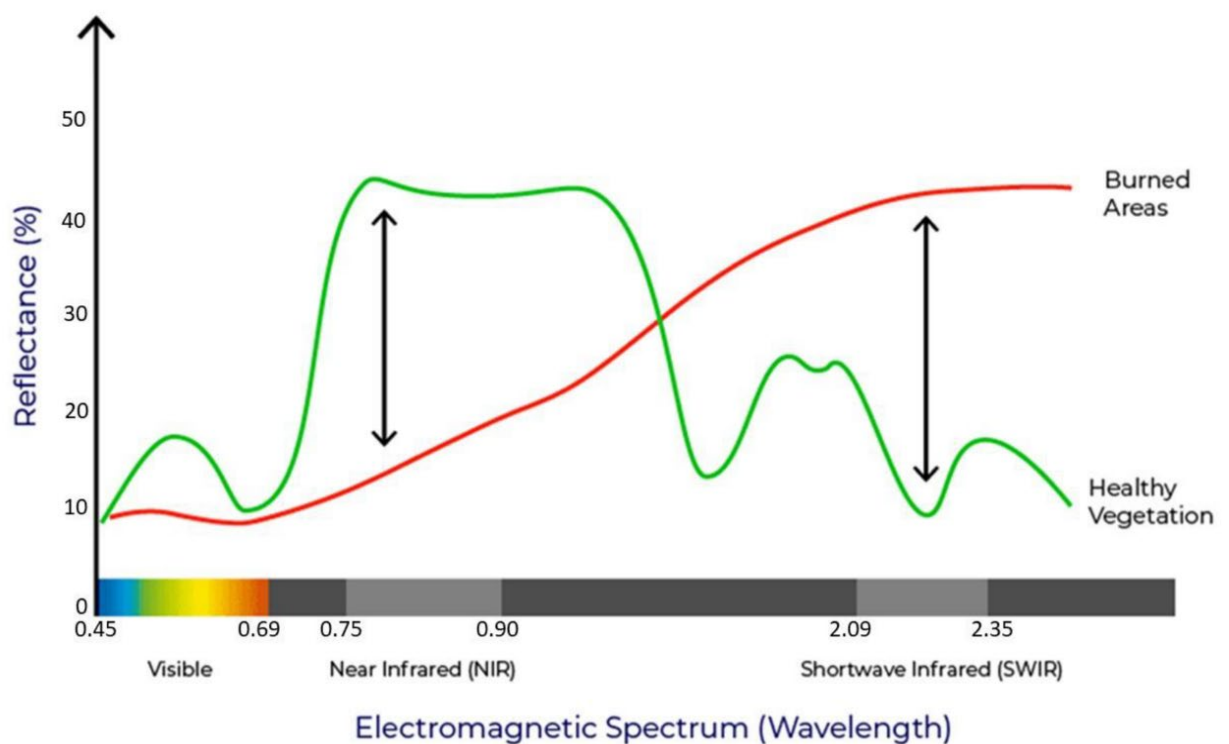


Рис. 10. Відображення здорової рослинності (зелений) та пошкоджених вогнем територій (червоний) в електромагнітному спектрі [40]

Формула розрахунку індексу NBR має такий вигляд:

$$\mathbf{NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)}$$

Це співвідношення дозволяє нормалізувати дані, тобто привести їх до єдиного діапазону значень, зазвичай від -1 до +1, де:

- Значення, близькі до +1, свідчать про здорову, незайману рослинність.

- Значення, близькі до 0 або від'ємні, вказують на вигорілі території з відсутністю або значним пошкодженням рослинного покриву.

Завдяки такому підходу можна легко порівнювати стан рослинності на різних ділянках зображення, навіть якщо самі знімки були зроблені за різних умов освітлення чи атмосферного впливу.

Практичне застосування індексу NBR охоплює як оперативне виявлення площ, що постраждали від лісових або степових пожеж, так і моніторинг процесів відновлення екосистем після стихійного лиха. Інтерпретація результатів може проводитися в різних ГІС-програмах (ArcGIS, QGIS), а також у хмарних сервісах обробки супутникових даних, таких як Google Earth Engine.

Окремо варто згадати про створення карт гару (burn severity maps). У таких випадках індекс NBR розраховується як для зображення до пожежі, так і для зображення після неї. На основі різниці між цими двома шарами обчислюється ΔNBR (delta NBR) – індекс змін, що дозволяє визначити ступінь пошкодження покриву:

$$\Delta\text{NBR} = \text{NBR}_{\text{після}} - \text{NBR}_{\text{до}}$$

Чим більшим є значення ΔNBR , тим інтенсивніше постраждала територія. Це дозволяє класифікувати вигорілі зони за ступенем ураження (легке, середнє, сильне) та приймати відповідні рішення щодо їхнього відновлення (рис. 11).

Індекс Видимої Атмосферостійкості (VARI)

Індекс видимої атмосферостійкості (VARI) є одним із найбільш ефективних вегетаційних індексів, який працює в межах видимого спектру електромагнітного випромінювання, охоплюючи червоний, зелений та синій діапазони.

На відміну від багатьох інших індексів, які використовують інфрачервоні спектральні ділянки, VARI розраховується виключно за допомогою RGB-даних, що робить його особливо зручним для аналізу звичайних кольорових знімків.

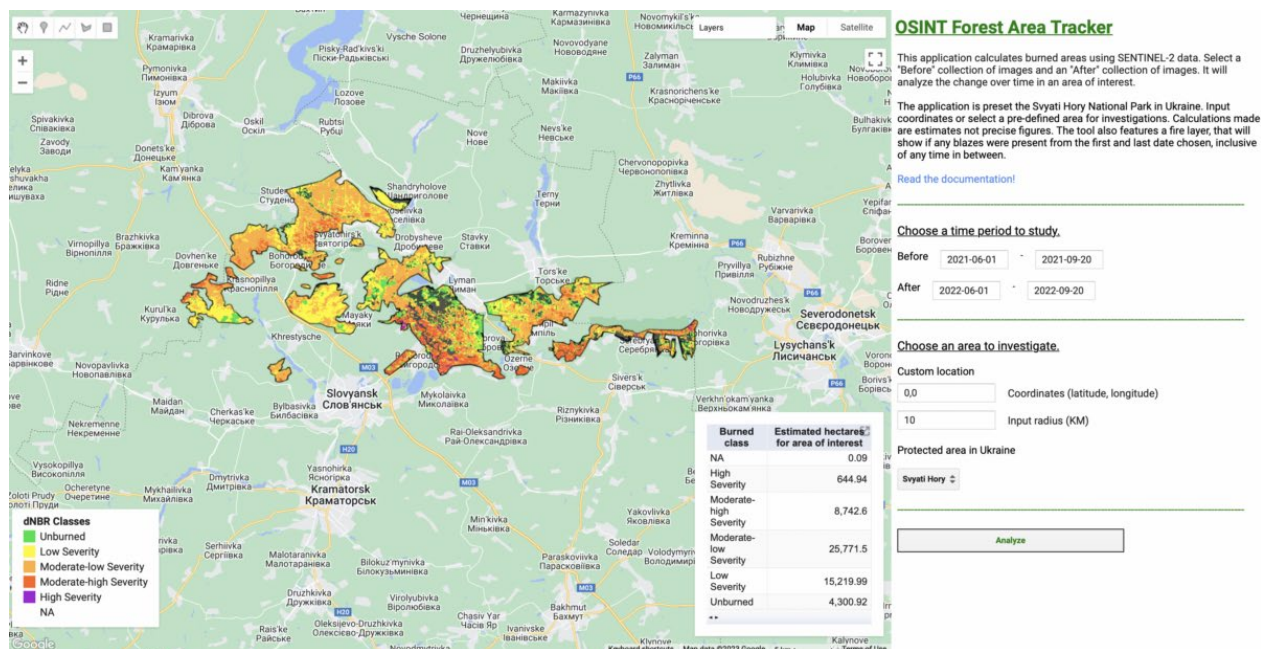


Рис. 11. Аналіз пошкодження Святогорських лісів внаслідок військових дій за допомогою індексу NBR [41]

Основне призначення VARI – це виділення рослинного покриття на зображеннях, отриманих в умовах сильного атмосферного впливу, таких як дим, пил, волога або хмарність. Цей індекс допомагає зменшити вплив атмосферних чинників на результати аналізу, завдяки своїй низькій чутливості до змін у товщині атмосфери, що суттєво підвищує точність визначення стану рослинності навіть у складних умовах спостереження [52].

Формула:

$$\text{VARI} = (\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED} - \text{BLUE})$$

У цій формулі: GREEN – відбиття в зеленому діапазоні, яке є найбільш характерним для рослинності; RED – відбиття в червоному діапазоні, де рослини поглинають більшість енергії; BLUE – відбиття в синьому діапазоні, яке використовується для компенсації атмосферних ефектів [52].

Важливою перевагою VARI є те, що похибка при вимірюванні рослинного покриття в умовах змінної атмосфери зазвичай не перевищує 10%, що робить цей індекс надзвичайно корисним для регіонів із нестабільними погодними умовами. VARI широко застосовується для аналізу даних із супутників, які оснащені

оптичними сенсорами, зокрема Sentinel-2, Landsat-8, GeoEye-1, Pleiades-1, QuickBird та IKONOS, що забезпечують якісні RGB-знімки. Практичне використання VARI охоплює різноманітні сфери: від оцінки стану сільськогосподарських культур і моніторингу природних екосистем до запобігання лісовим пожежам. Зокрема, індекс дозволяє виявляти ослаблені або сухі ділянки рослинності, які становлять підвищений ризик загоряння, що сприяє більш ефективному управлінню лісовими ресурсами та плануванню заходів пожежної безпеки.

Таким чином, VARI є універсальним і надійним інструментом для моніторингу рослинності в умовах обмежених спектральних даних та складних атмосферних умов (рис. 12). Його застосування допомагає агрономам, екологам та фахівцям з управління природними ресурсами отримувати точну і оперативну інформацію, необхідну для прийняття зважених рішень щодо збереження та відновлення екосистем.

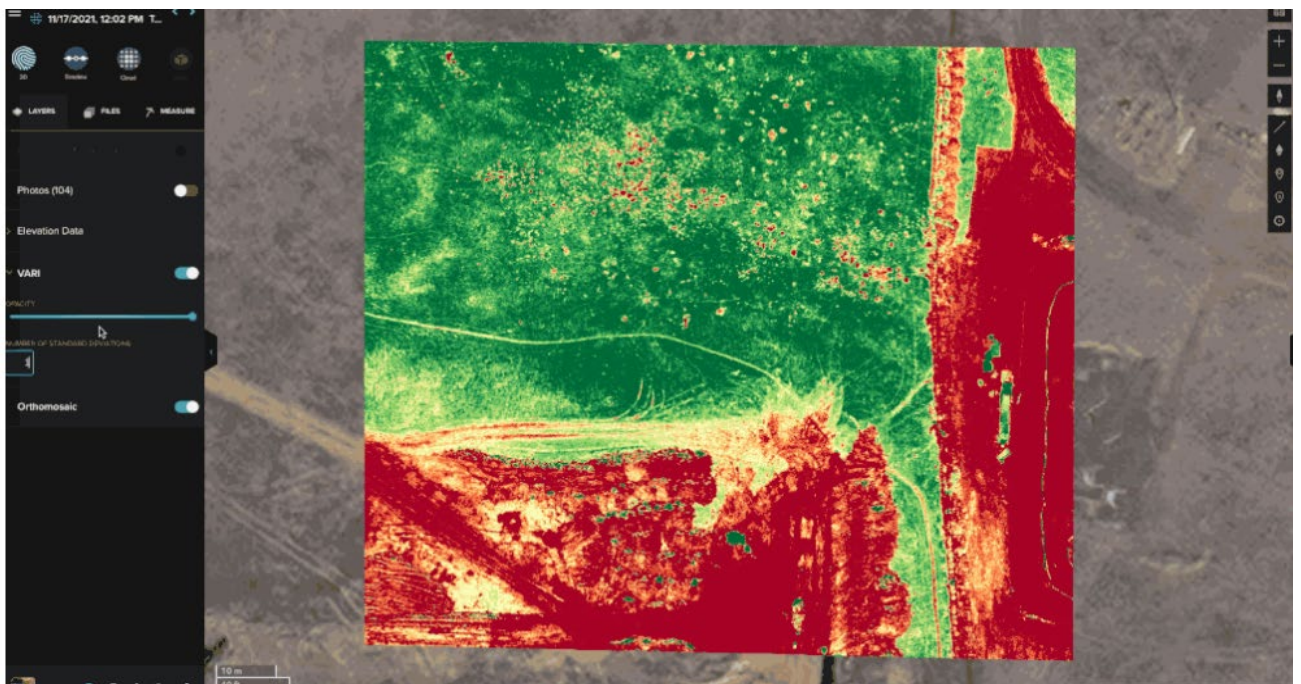


Рис. 12. Аналіз пошкодження території внаслідок військових дій за допомогою індексу VARI [27]

Індекс покращеної вегетації (Enhanced Vegetation Index, EVI) – це один із сучасних спектральних вегетаційних індексів, розроблений для більш точної оцінки стану рослинності, особливо в регіонах із густим рослинним покривом, де традиційний індекс NDVI може бути менш ефективним через насичення сигналу. EVI був створений з урахуванням недоліків NDVI, зокрема з метою зменшити вплив атмосферних ефектів та вплив ґрунтового фону на результати аналізу.

Принцип роботи EVI (рис. 13) полягає у використанні даних трьох спектральних каналів: ближнього інфрачервоного (NIR), червоного (RED) та синього (BLUE). Включення синього каналу дозволяє коригувати атмосферні спотворення, такі як розсіювання світла через аерозолі. Таким чином, EVI краще компенсує ефекти атмосферного впливу і мінімізує похибки, спричинені присутністю пилу, диму чи інших частинок у повітрі.

Формула для розрахунку EVI має вигляд:

$$\mathbf{EVI} = \mathbf{G} \times (\mathbf{NIR} - \mathbf{RED}) / (\mathbf{NIR} + \mathbf{C1} \times \mathbf{RED} - \mathbf{C2} \times \mathbf{BLUE} + \mathbf{L})$$

де G – коефіцієнт посилення (gain), який зазвичай дорівнює 2.5;

C1 і C2 – коефіцієнти корекції для червоного і синього каналів відповідно (C1 = 6, C2 = 7.5);

L – корекційна константа, що враховує вплив ґрунтового фону (L = 1).

Значення EVI, як і NDVI, зазвичай варіюються від -1 до +1, де високі позитивні значення вказують на здоровий, густий рослинний покрив, а низькі або від’ємні - на слабку або відсутню рослинність.

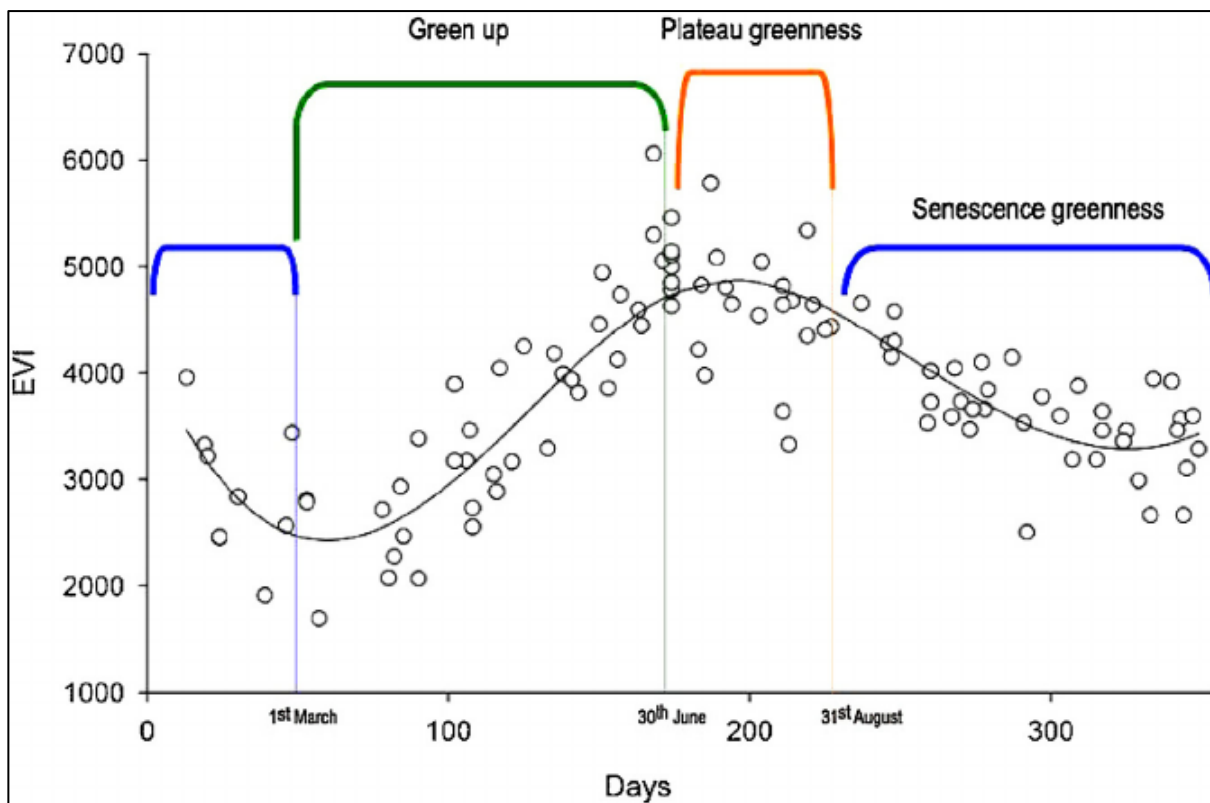


Рис. 13. Сезонні тенденції Індексу розширеної рослинності (EVI) [45]

Однією з ключових переваг EVI є його висока чутливість до змін у стані густого лісового покриву або інтенсивно ростучих культур, де NDVI може «насичуватися», тобто перестає коректно відображати подальше збільшення зеленості через максимальне відбиття інфрачервоного світла. Завдяки цьому EVI широко застосовується у моніторингу тропічних лісів, аграрних угідь, а також для виявлення ранніх стадій стресу у рослин.

EVI активно використовується у супутникових програмах, таких як MODIS (NASA), Sentinel-2 (ESA) та Landsat-8, що мають спектральні канали, необхідні для його обчислення. Завдяки кращій атмосферній корекції і меншій залежності від ґрунтового фону, EVI часто застосовують для більш точного моніторингу екологічних змін, аналізу посух, оцінки продуктивності сільськогосподарських культур та управління природними ресурсами.

У комплексі з іншими вегетаційними індексами, такими як NDVI, EVI забезпечує більш повну і точну картину стану рослинності, особливо в умовах складних екологічних та кліматичних факторів (рис. 14). Це робить його

незамінним інструментом для екологів, агрономів і фахівців з дистанційного зондування у завданнях моніторингу та управління природними екосистемами.

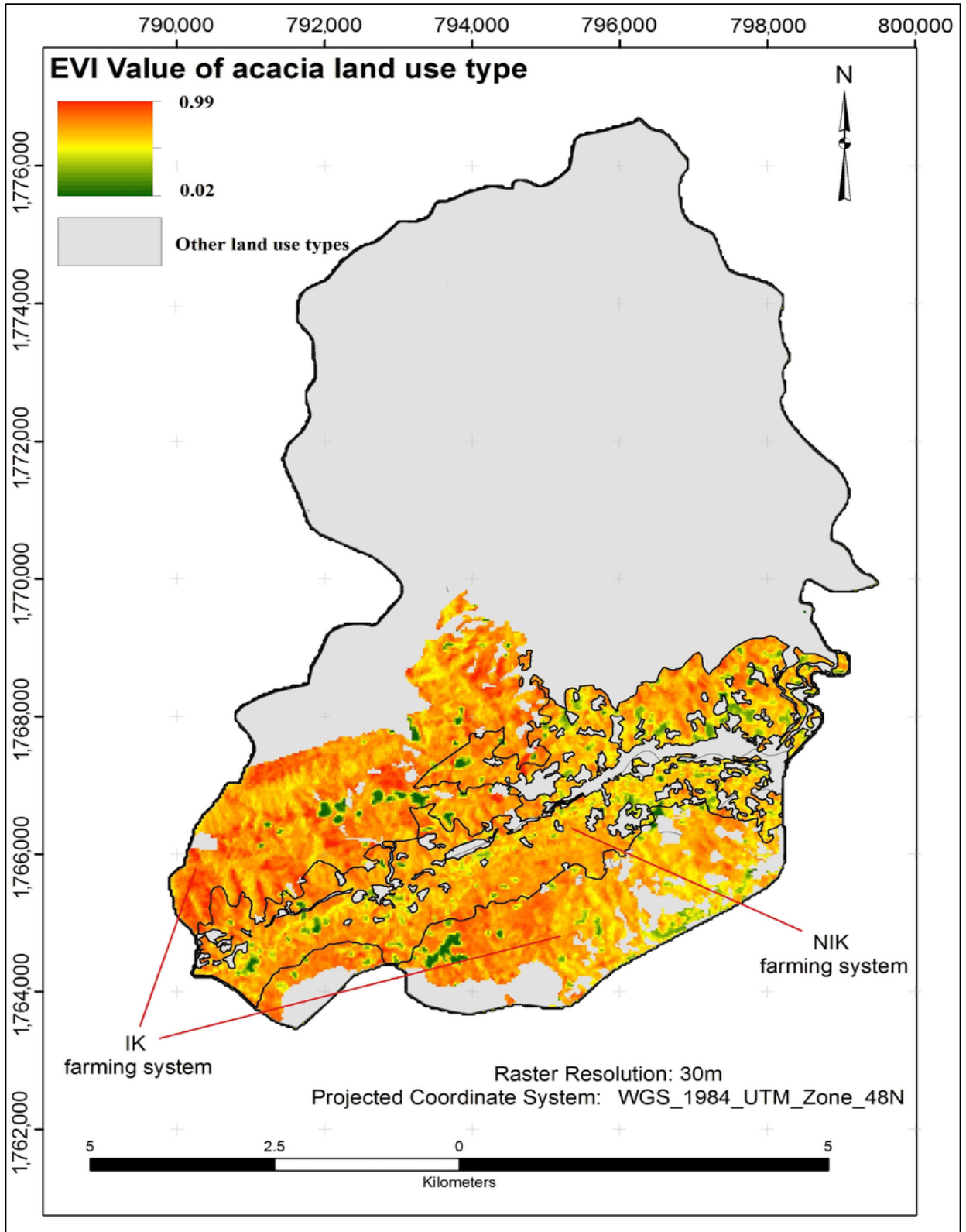


Рис. 14. Карта EVI для районів сільськогосподарських систем ІК та NIK [48]

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ІЗЮМСЬКИХ ЛІСІВ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНДЕКСУ NDVI

3.1. Методика для аналізу впливу військових дій на територію лісу з використанням спектральних індексів

Для початку нам потрібно обрати територію та, використовуючи сайт EO Browser, де зберігається численний архів з багатьма видами космічних знімків, завантажити знімки з супутнику Sentinel-2 для двох періодів: до військових дій та сучасний стан лісів, які зазнали значного військового впливу. Обираємо знімки з мінімальною хмарністю, щоб не було проблем під час роботи (рис. 15).

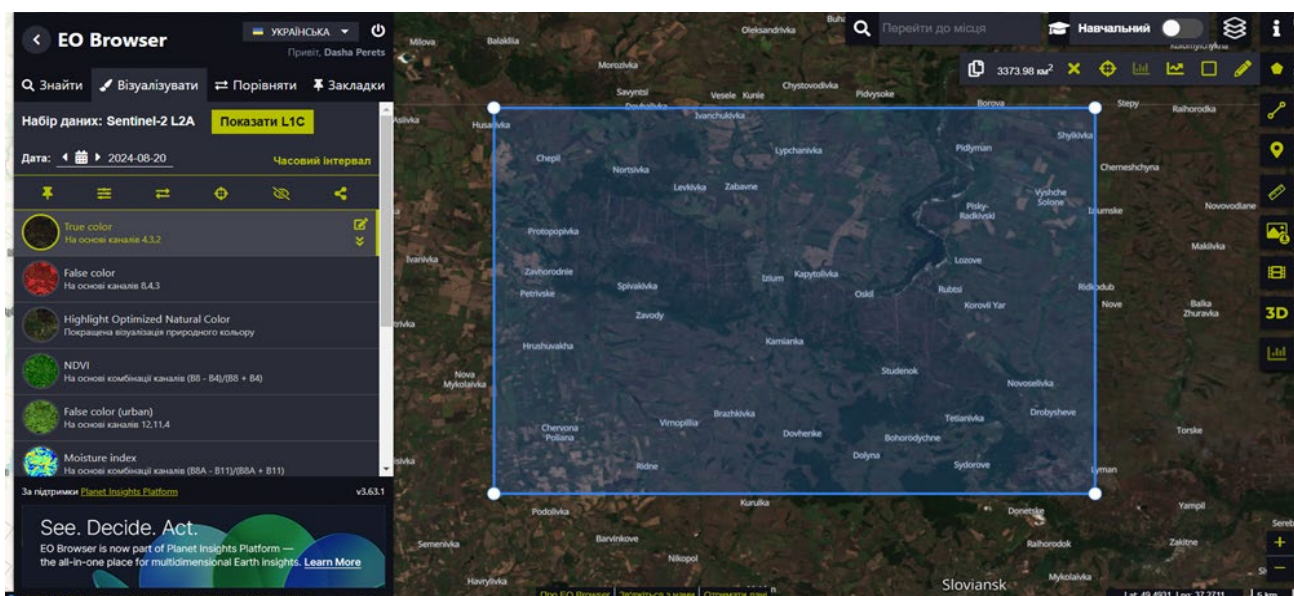


Рис. 15. Процес пошуку потрібних знімків [44]

Нас цікавлять певні канали, з якими ми будемо працювати. Для індексу NDVI (рис. 16) це NIR (Near Infrared) – ближній інфрачервоний спектр та Red – червоний спектр, адже завдяки ним ми зможемо самостійно вирахувати значення індексу. Для NBR (рис. 17) нам потрібно зберегти NIR та SWIR спектри. Стосовно формату зображення, то ми використовуємо TIFF (32-bit float). Також

потрібна висока просторова розрізненість зображення, для більш зручного аналізу території. Всі ці дії ми робимо для знімків станом на 2020 та 2024 роки одного вегетаційного періоду.

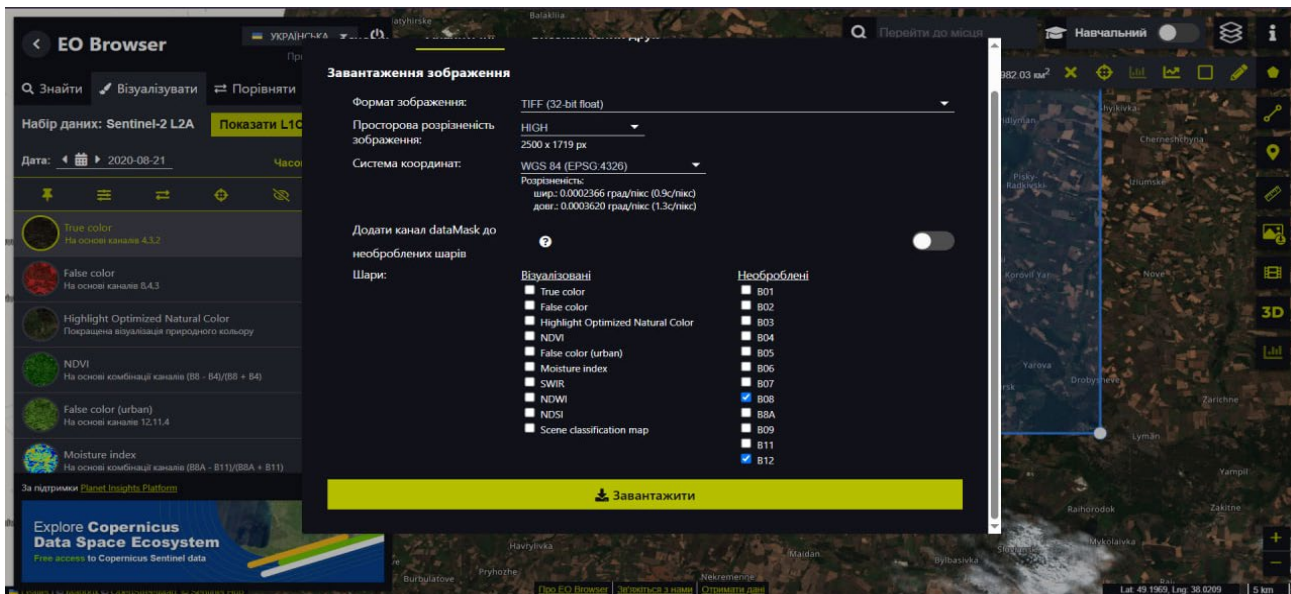


Рис. 16. Обрані параметри зберігання знімків для NDVI [44]

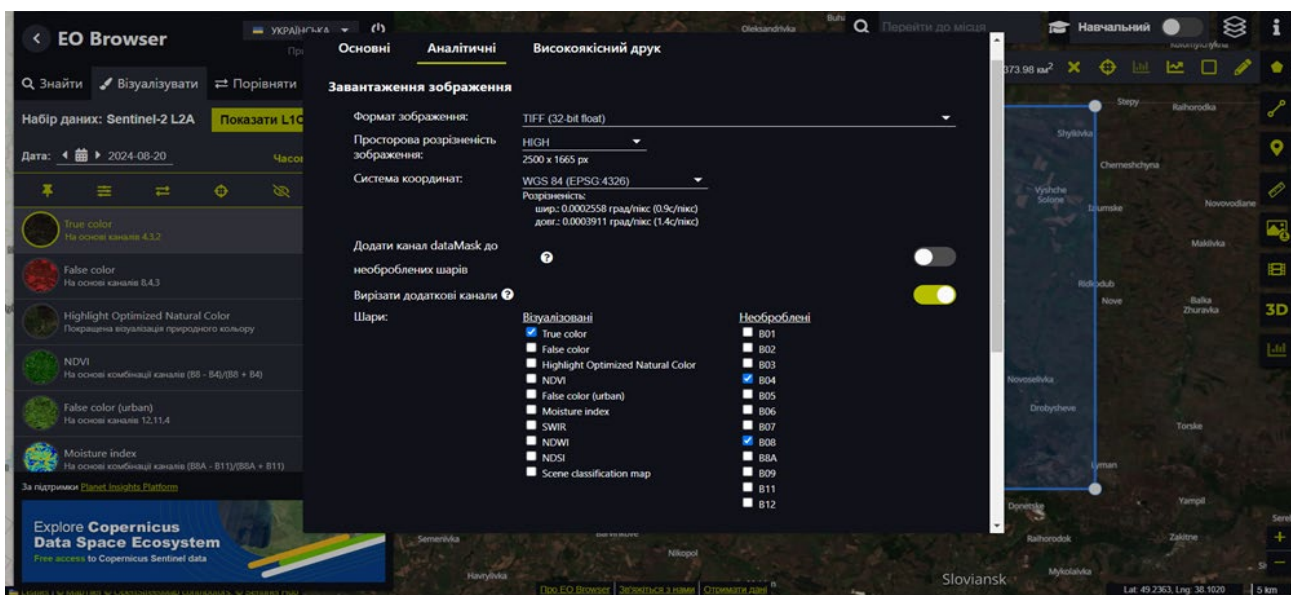


Рис. 17. Обрані параметри зберігання знімків для NBR [44]

Для дослідження я обрала частину лісу поблизу міста Ізюм (рис. 18). Загальна площа досліджуваної ділянки становить близько 475 км², що дозволяє охопити значну частину природних лісових екосистем регіону. Територія дослідження включає як природні, так і культурно змінені лісові ландшафти, що потенційно зазнали впливу бойових дій, особливо в період повномасштабної війни з 2022 року.



Рис. 18. Територія дослідження [44]

3.1.1. Аналіз стану лісів за допомогою NDVI

Далі проводимо розрахунок NDVI для обох періодів. Для цього ми використовуємо програмне забезпечення ArcGIS 10.8. Завантажуємо потрібні канали та виконуємо розрахунок. Відкриваємо ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Map Algebra – Raster Calculator. Далі вводимо формулу (рис. 19) для обчислення NDVI:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

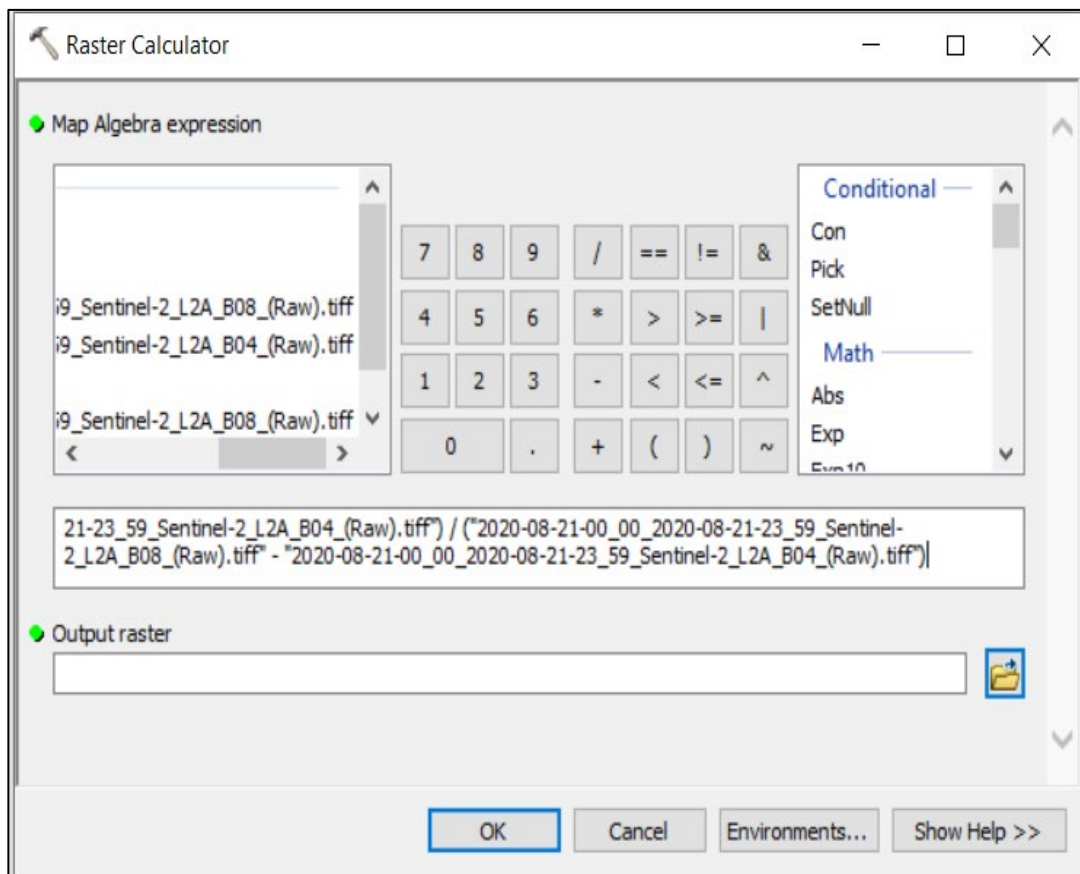


Рис. 19. Розрахунок NDVI

Виконуємо дані дії для обох знімків (рис. 20-21) та зберігаємо результати. Потрібно переконатися, що діапазон значень NDVI становить від -1 до 1.

**Індексне зображення рослинності Ізюмських лісів
станом на 2020 р.**

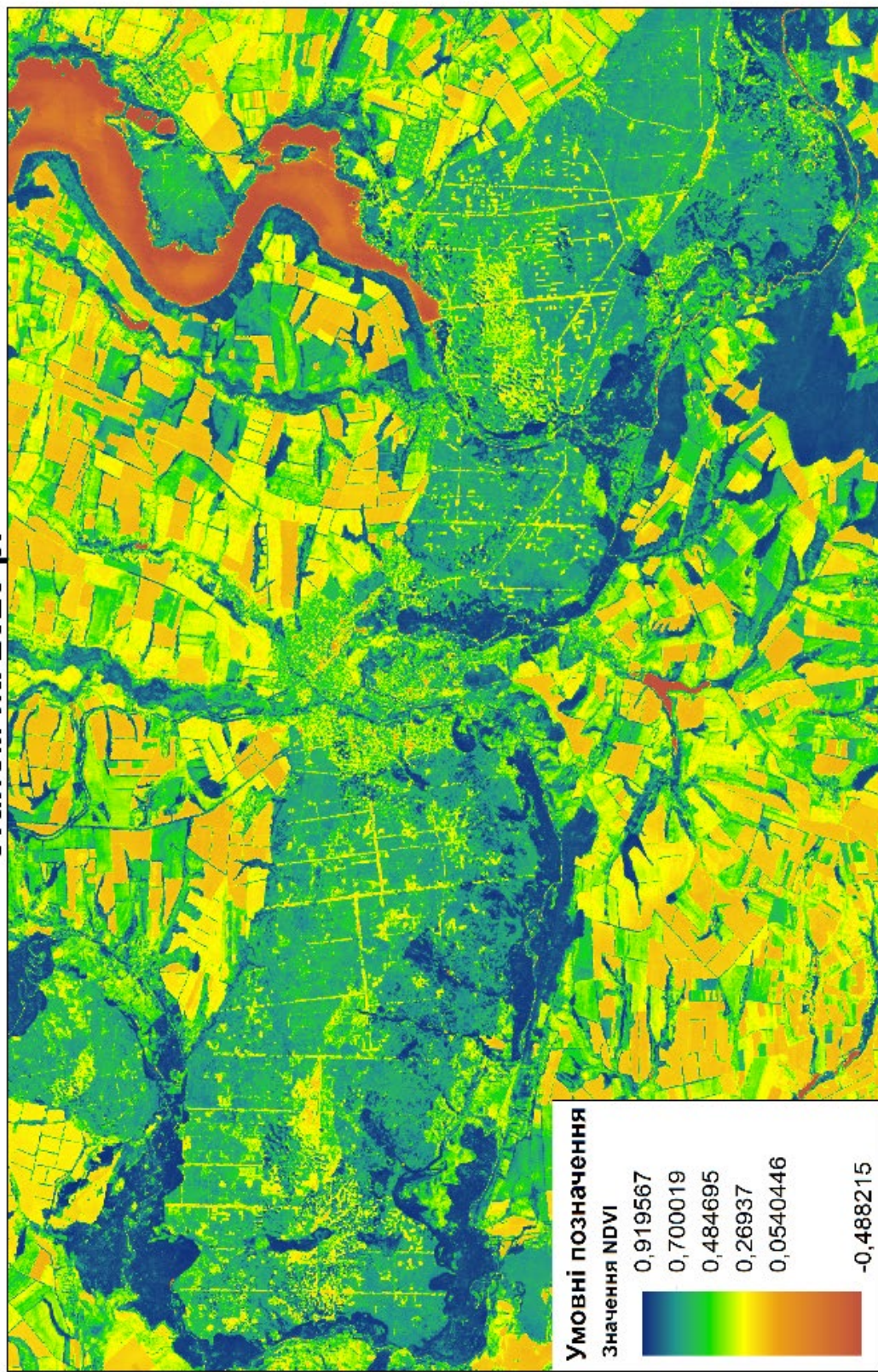


Рис. 20. Індексне зображення рослинності Ізюмських лісів станом на 21 серпня 2020 року

**Індексне зображення рослинності Ізюмських лісів
станом на 2024 р.**

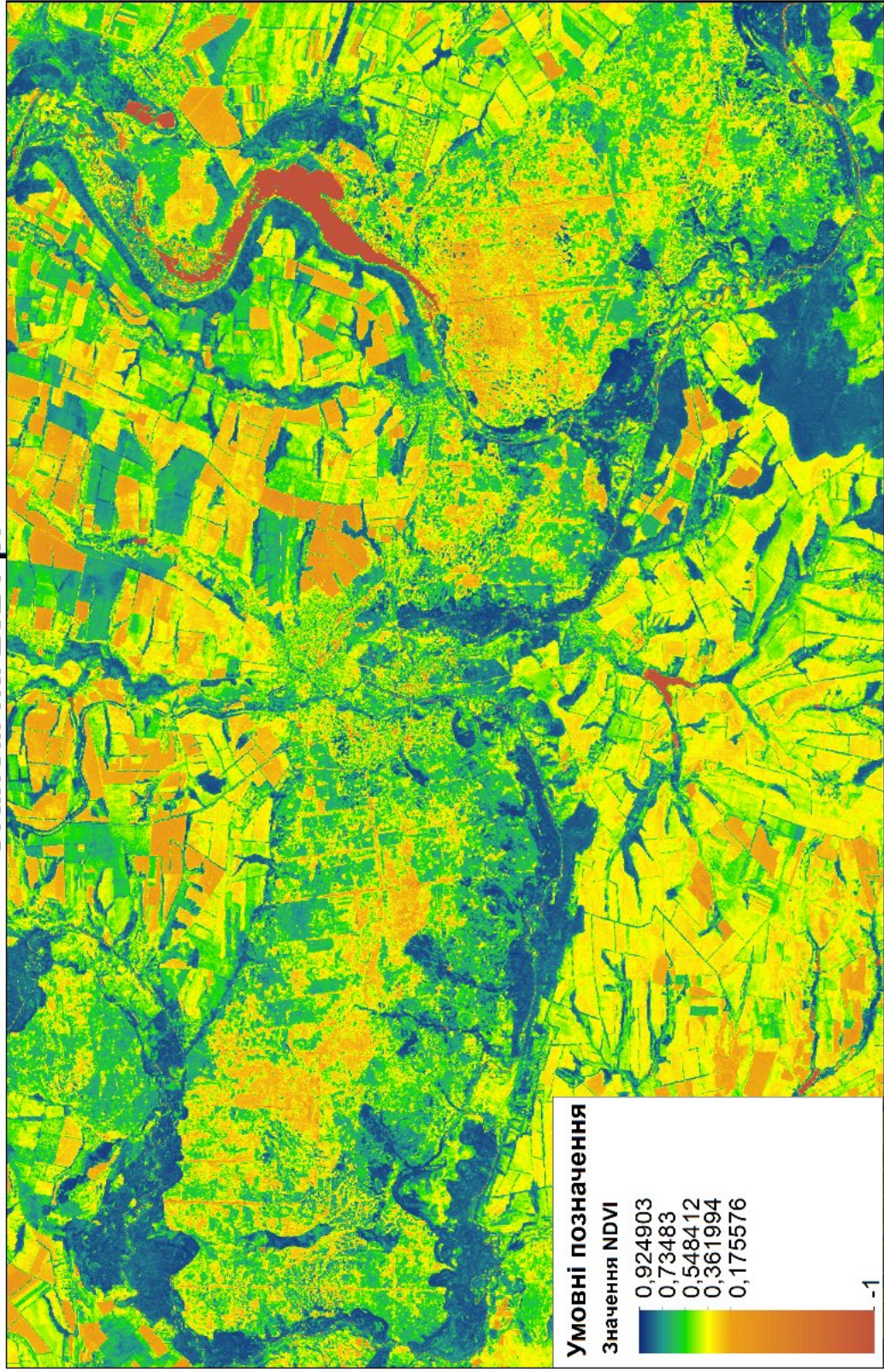


Рис. 21. Індексне зображення рослинності Ізюмських лісів станом на 20 серпня 2024

Далі проводимо обчислення різниці NDVI (рис. 22). Для цього знову відкриваємо Raster Calculator та вводимо формулу для різниці між двома періодами:

$$\text{NDVI_Change} = \text{"NDVI_After"} - \text{"NDVI_Before"}$$

У нашому випадку від NDVI 2024 року ми віднімаємо NDVI 2020 року.

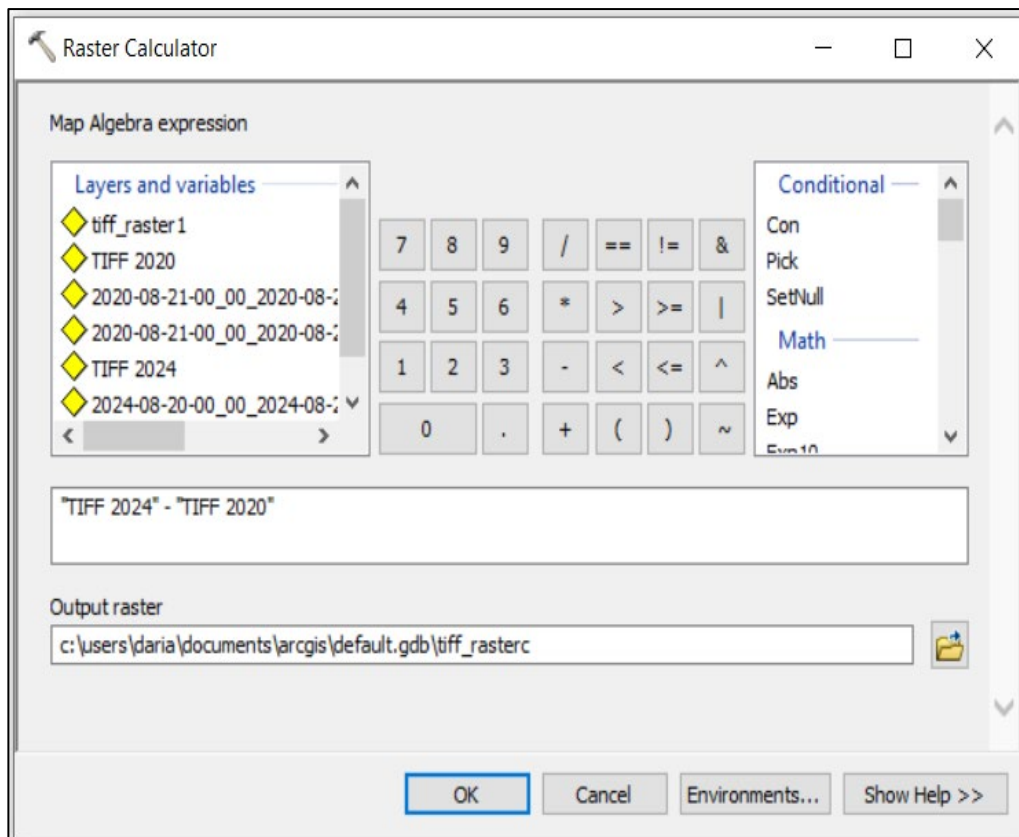


Рис. 22. Обчислення динаміки рослинності за період з 2020 по 2024 роки

Потім, для полегшення аналізу, ми проводимо візуалізацію результату: додаємо кольорову шкалу та визначаємо кількість класів (рис. 23).

**Індексне зображення динаміки змін рослинності Ізюмських лісів
за період від 2020 до 2024 рр.**

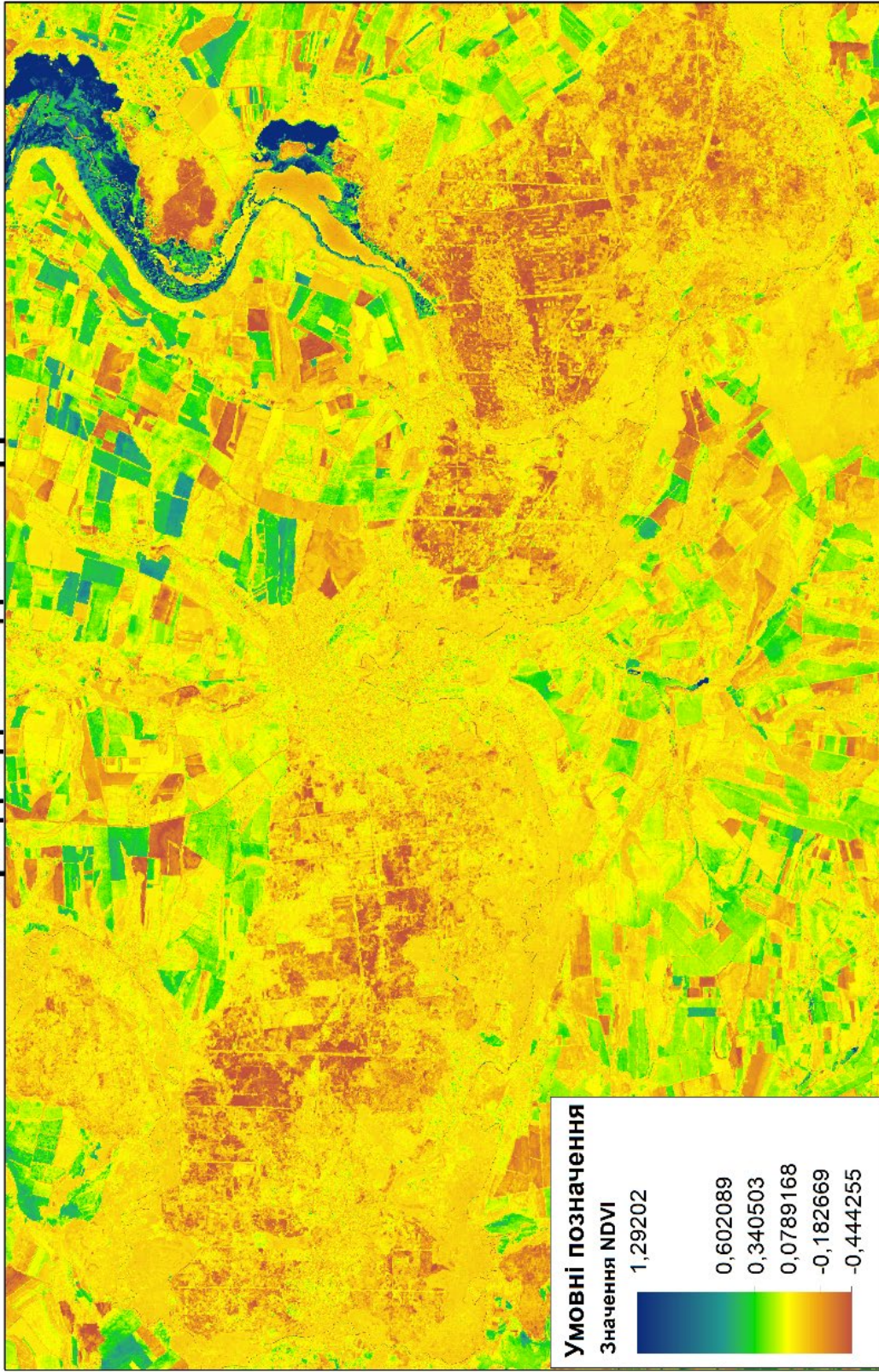


Рис. 23. Індексне зображення динаміки змін рослинності Ізюмських лісів за період від 2020 до 2024 рр.

Карта NDVI за 2020 рік свідчить про досить високий рівень рослинного покриття в межах Ізюмських лісів. Високі значення NDVI (понад 0,7) зафіксовані на значній частині території, що вказує на густі ліси з добре розвиненим фотосинтетичним апаратом. Особливо це характерно для південно-західної, центральної та частково північно-західної частин регіону. Умовно-сільськогосподарські території, відкриті ґрунти та водойми відображені в жовтих, оранжевих і коричневих тонах, відповідно до нижчих значень NDVI (від 0,05 до 0,27 та нижче).

На зображенні за 2024 рік простежується суттєве зменшення щільності рослинного покриття. Візуально видно зменшення площ із високими значеннями NDVI. Більшість територій, які раніше мали NDVI понад 0,7, тепер мають значення в межах 0,36 - 0,54, а в окремих випадках навіть нижчі. Особливо помітною є деградація у південно-східній та східній частинах, де з'являються великі червоні та бурі плями. Це свідчить про значне зниження рівня живої рослинної маси.

За картою динаміки змін за період від 2020 до 2024 років чітко видно, що значна частина Ізюмських лісів зазнала деградації, особливо у районах, де інтенсивно відбувалися бойові дії. Червоні та помаранчеві ділянки демонструють значні пошкодження рослинного покриття, що, ймовірно, є наслідком воєнних дій: обстрілів, пожеж, або механічного руйнування через техніку. Такі пошкодження характерні для районів з інтенсивними бойовими діями. Жовті ділянки показують посередній стан рослинності, що може свідчити про часткове пошкодження, стрес рослин або поступове відновлення територій. Зелені та сині ділянки – це області з відносно стабільним та здоровим рослинним покриттям. Такі ділянки могли уникнути прямих руйнувань або перебувають на периферії бойових дій.

Центральна частина карти охоплює густі лісові ділянки, які здебільшого відображені жовтим і коричневим кольорами. Це може вказувати на зниження рослинності у період з 2020 до 2024 року. На околицях карти, особливо на

північному сході й півдні, спостерігаються зелені й сині ділянки, які свідчать про стабільний стан рослинності або високопродуктивні сільськогосподарські угіддя. Праворуч на карті чітко видно синюваті ділянки, які відображають водойму, а саме Оскільське водосховище, яке також зазнало катастрофічного впливу від військових дій на даній території. NDVI для води зазвичай має низькі або негативні значення. Окремі помаранчеві й жовтуваті ділянки в центральній та південній частині карти можуть бути індикаторами деградованих та пошкоджених лісів.

3.1.2. Аналіз стану лісів за допомогою NBR

Для розрахунку індексу NBR (рис. 24) виконуємо схожі дії, як і для NDVI. Для початку завантажуюмо потрібні нам канали в програмне середовище ArcGIS 10.8. та проводимо розрахунок. Відкриваємо ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Map Algebra – Raster Calculator. Далі вводимо формулу для обчислення NBR:

$$\mathbf{NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)}$$

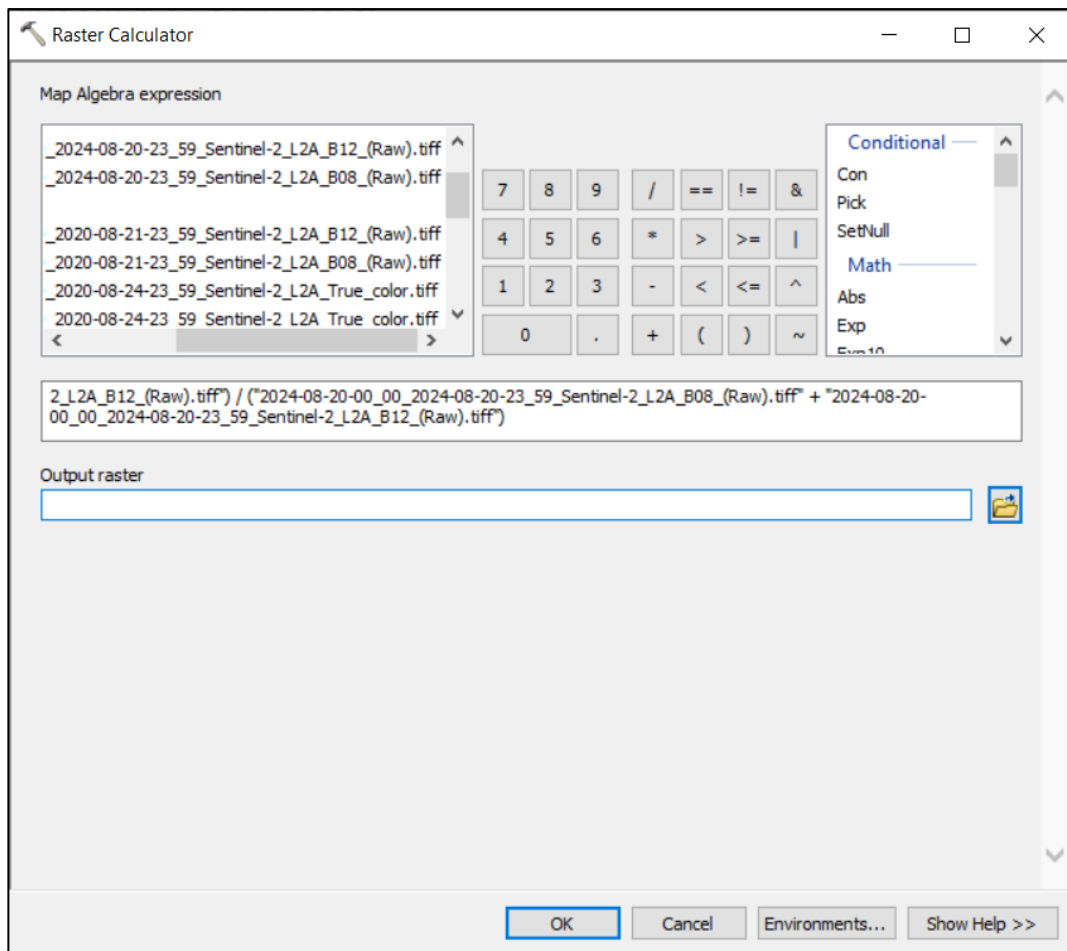


Рис. 24. Обчислення NBR

Виконуємо дані дії для обох знімків та зберігаємо результати (рис. 25, 26).
Потрібно переконатися, що діапазон значень NBR становить від -1 до 1.

**Індексне зображення рослинності Ізюмських лісів
станом на 2020 р.**

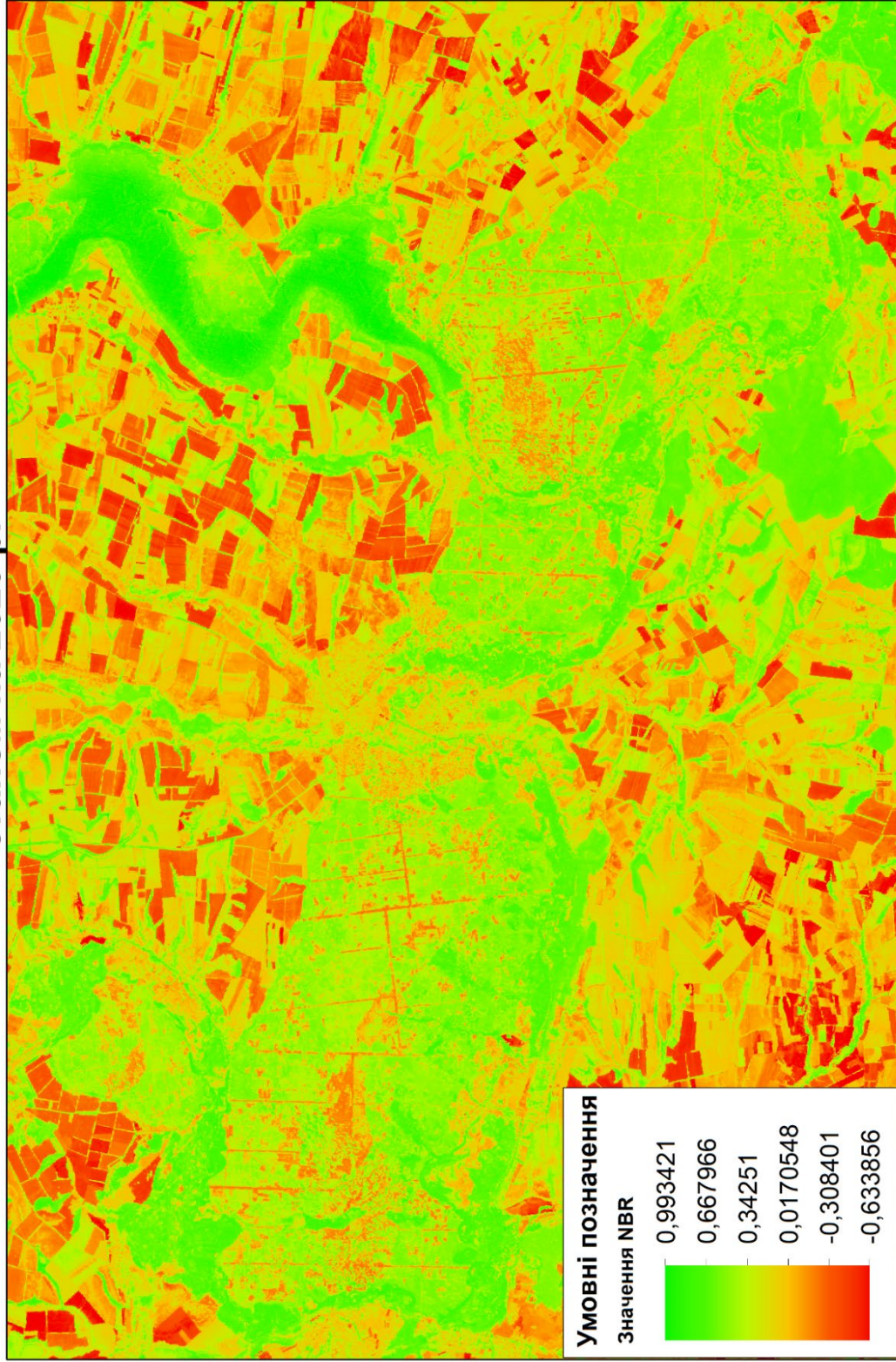


Рис. 25. Індексне зображення рослинності Ізюмських лісів станом на 21 серпня 2020 року

**Індексне зображення рослинності Ізюмських лісів
станом на 2024 р.**

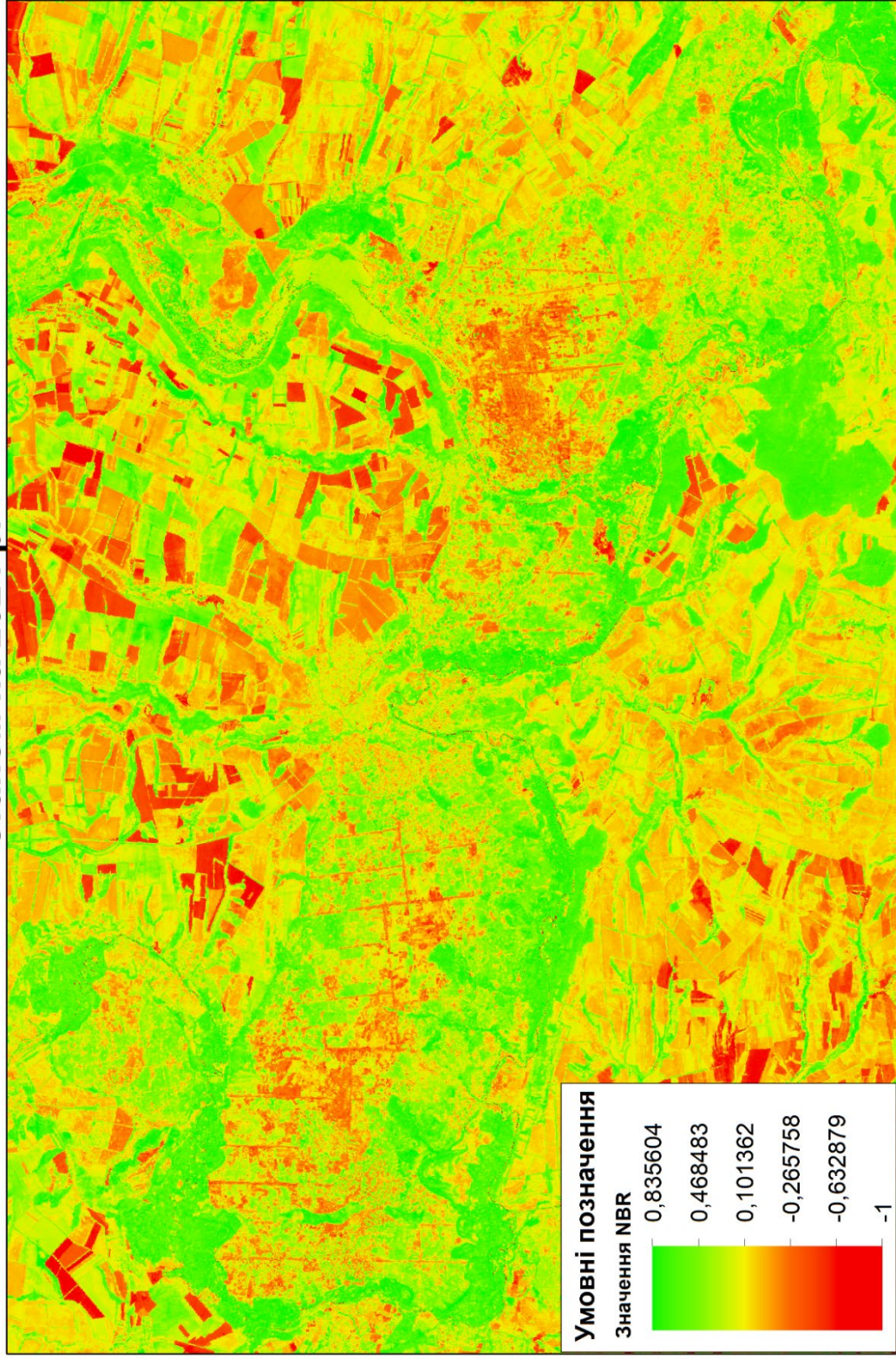


Рис. 26. Індексне зображення рослинності Ізюмських лісів станом на 20 серпня 2024 року

Далі проводимо обчислення різниці NBR (рис. 27). Для цього знову відкриваємо Raster Calculator та вводимо формулу для різниці між двома періодами:

$$\text{NBR_Change} = \text{"NBR_After"} - \text{"NBR_Before"}$$

У нашому випадку від NBR 2024 року ми віднімаємо NBR 2020 року.

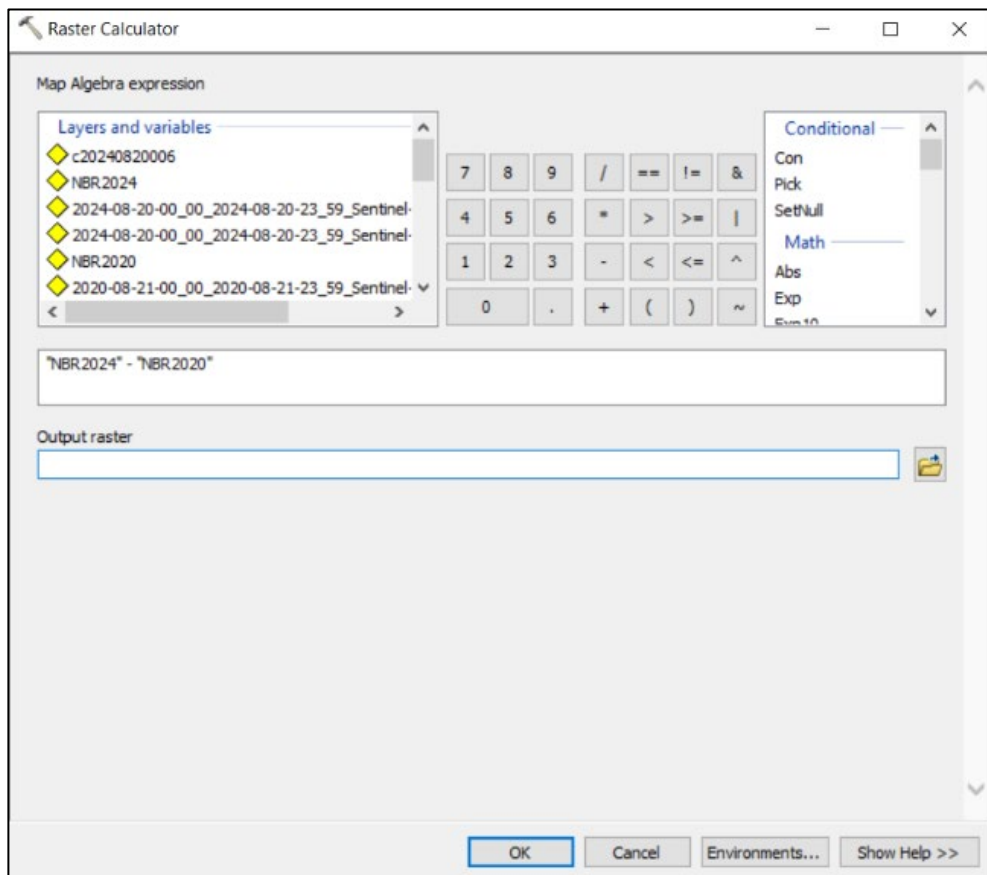


Рис. 27. Обчислення динаміки рослинності за період з 2020 по 2024 роки

Потім, для полегшення аналізу, ми проводимо візуалізацію результату: додаємо кольорову шкалу та визначаємо кількість класів (рис. 28).

**Індексне зображення динаміки змін рослинності Ізюмських лісів
за період від 2020 до 2024 рр.**

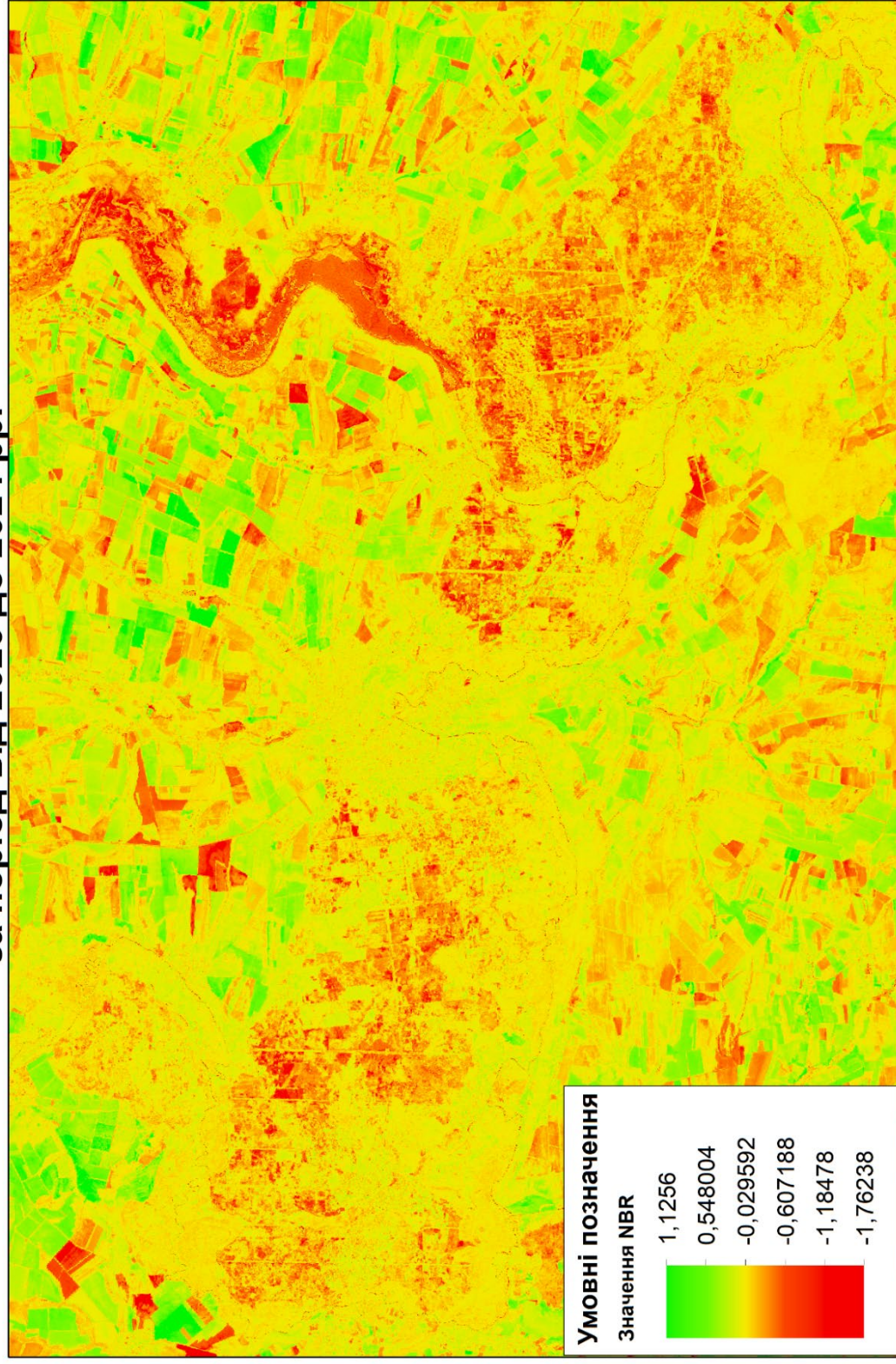


Рис. 28. Індексне зображення динаміки змін рослинності Ізюмських лісів за період від 2020 до 2024 рр.

Аналіз NBR-для Ізюмських лісів за 2020 та 2024 роки дозволяє простежити просторові та якісні зміни в рослинному покриві впродовж цього періоду, особливо враховуючи, що ця територія зазнала активних бойових дій.

На зображенні NBR за 2020 рік значення індексу коливаються в діапазоні від -0,63 до 0,99. Це вказує на широкий спектр покриттів – від відкритого ґрунту або згорілої рослинності (низькі або від’ємні значення) до щільного здорового лісу (високі значення). Переважаючий зелений колір на зображенні свідчить про здоровий стан лісової рослинності.

Основні лісові масиви мали високі значення індексу (понад 0,6), що відповідає добре розвиненій деревній рослинності без ознак деградації. Локальні жовті або помаранчеві ділянки можуть відповідати сільськогосподарським угіддям, чагарникам або відкритим територіям з меншою біомасою. Отже, у 2020 році територія Ізюмських лісів переважно зберігала природний рослинний покрив у доброму екологічному стані.

Індексне зображення NBR за 2024 рік демонструє значне зниження як максимальних, так і середніх значень індексу. Діапазон тепер становить від -1 до 0,83, а на зображенні помітно зменшення площ із високими значеннями індексу. Зелені зони скоротилися, що вказує на втрату здорової деревної рослинності. Поява червоних, жовтих і коричневих тонів на місці раніше зелених ділянок свідчить про дефоліацію, деградацію або знищення лісу. Особливо постраждали центральна та південна частини лісового масиву, де спостерігається явне зниження індексу.

Зображення, що відображає різницю між NBR 2024 і 2020 років, дозволяє чітко виявити території деградації або відновлення рослинного покриву. Найнижчі значення Δ NBR (до -1,76) вказують на різке погіршення стану рослинності. Ці ділянки зображені в червоних відтінках - це осередки повного знищення рослинного покриву. Помірні від’ємні значення (до -0,5) свідчать про часткову деградацію - зменшення щільності або площі вегетації. Нейтральні зони (~ 0) залишились без суттєвих змін. Позитивні значення (до +1,12) - рідкісні,

локальні, позначають відновлення вегетації або зростання біомаси, наприклад, на полях, де відновили ріст трав'янисті або чагарникові рослини.

3.1.3. Створення та аналіз комплексної карти стану Ізюмських лісів на основі індексів NDVI та NBR.

За допомогою інструменту Raster Calculator у нас є змога вирахувати різницю між двома індексами (рис. 29) та на основі цього створити комплексну карту для оцінки впливу військових дій на дану територію. Для цього ми використали просту формулу:

$$\Delta = \text{NDVI} - \text{NBR}$$

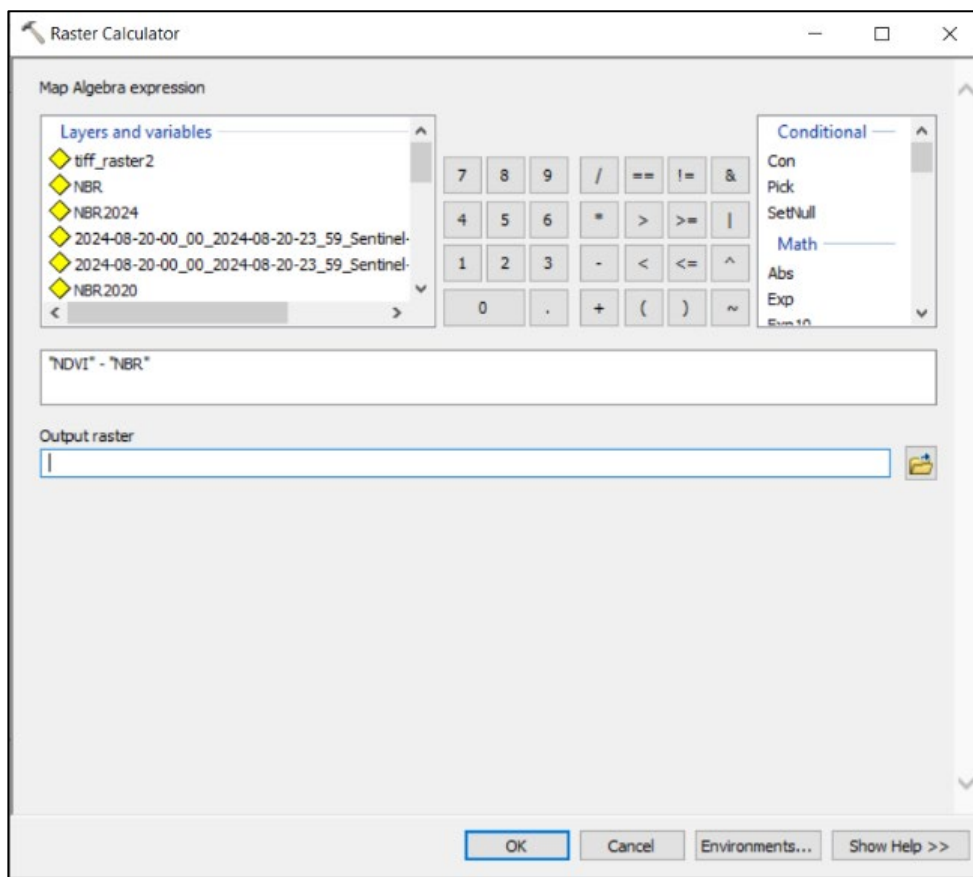


Рис. 29. Обчислення комплексного стану Ізюмських лісів за період з 2020 по 2024 роки

Об'єднання карт з індексами NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) та NBR (Normalized Burn Ratio) є потужним підходом для комплексної оцінки стану лісових екосистем (рис. 30). Це дозволяє поєднати інформацію про загальну біомасу та вегетаційне здоров'я (NDVI) з оцінкою деградації або впливу пожеж (NBR).

Аналіз карти показує, що територія Ізюмських лісів має значну просторову неоднорідність у рівнях збереження або деградації. Північна та північно-східна частина регіону здебільшого відзначається високими значеннями індексів (0.2 – 1.7), що відображено темно-зеленими відтінками на карті. Це свідчить про збереженість лісового покриву в цих районах. Тут рослинність перебуває у відносно стабільному стані, імовірно, що ці території або не зазнали суттєвого впливу, або змогли частково відновитися після короткотривалих стресових факторів.

Центральна частина регіону демонструє змішані ознаки змін. Тут переважають жовті й помаранчеві відтінки, що свідчить про помірну або сильну деградацію рослинного покриву. Такі зміни можуть бути наслідком як людської діяльності (наприклад, вирубки лісів), так і природних або антропогенних катастроф, зокрема пожеж. Також не можна виключати вплив бойових дій, які проходили на цій території.

Найбільш критична ситуація спостерігається на півдні та південному сході Ізюмських лісів. Ці зони представлені переважно червоними ділянками на карті, що відповідає найнижчим значенням індексів (-0.5 до -2.0). Це свідчить про майже повне знищення або надзвичайно глибоку деградацію лісового покриву. Основними причинами такого стану, ймовірно, стали бойові дії - зокрема, артилерійські обстріли, авіаудари, рух важкої техніки та пов'язані з цим пожежі. Ураження лісів у цих зонах має катастрофічний характер і потребує як термінових заходів з екологічної реабілітації, так і довгострокових стратегій лісовідновлення.

Комплексна карта стану Ізюмських лісів на основі індексів NDVI та NBR за період від 2020 до 2024 рр.

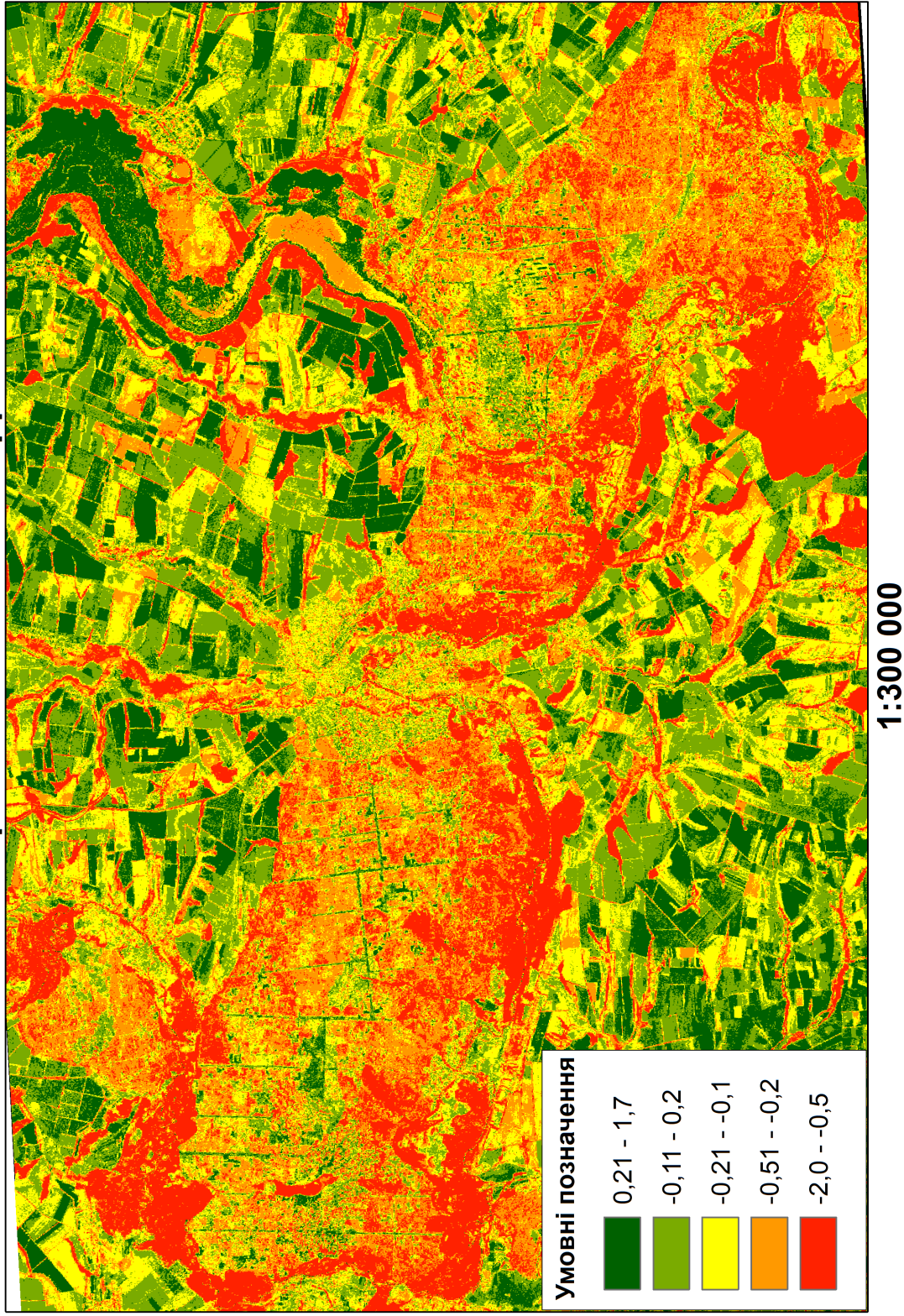


Рис. 30. Комплексна карта стану рослинності Ізюмських лісів за період від 2020 до 2024 рр.

Окрему увагу привертають смуги червоного та помаранчевого кольорів, що проходять крізь зелені зони – ймовірно, це лінії фронту, дороги або напрямки просування військової техніки, які були розчищені від лісу або зазнали інтенсивного обстрілу. Подібна мозаїчність ландшафту є типовою для регіонів, які пережили активні бойові дії. Складність ситуації підсилюється тим, що значна частина постраждалих територій залишається небезпечною для доступу через мінування, що ускладнює проведення відновлювальних робіт.

3.2. Використання результатів дослідження для перспективи відновлення Ізюмських лісів у майбутньому

Застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у поєднанні зі спектральними індексами, такими як NDVI (індекс нормалізованої різниці рослинності), NBR (індекс вигорання), та EVI (покращений індекс рослинності), дозволило отримати точні дані про просторове розташування та ступінь пошкодження лісових масивів. На основі аналізу супутникових знімків до та після активної фази війни вдалося ідентифікувати повністю вигорілі ділянки, зони часткової втрати вегетації та території, які мають потенціал для природного відновлення.

Ці результати дають змогу створити детальні карти деградованих територій, які стануть основою для планування заходів з лісовідновлення. У першу чергу увага зосереджується на ділянках, де ліс повністю втрачено, а природна регенерація є малоімовірною. Особливо важливою умовою початку будь-яких робіт з відновлення є проведення повного гуманітарного розмінування територій, оскільки на значній частині лісів досі залишаються вибухонебезпечні предмети.

Після розмінування територій розпочинається етап активного відновлення – висаджування нових саджанців місцевих деревних порід, таких як сосна, дуб, ясен, липа. Посадковий матеріал підбирається з урахуванням місцевих ґрунтово-

кліматичних умов, а сам процес висадки виконується з дотриманням сучасних лісівничих та агротехнічних практик. Ці заходи здійснюються у співпраці з лісогосподарськими підприємствами, місцевими громадами та волонтерами.

Крім штучного лісовідновлення, паралельно проводиться моніторинг процесів природної регенерації. За допомогою індексів NDVI та EVI здійснюється контроль за зростанням рослинності, її щільністю та життєздатністю. Систематичний супутниковий моніторинг дозволяє виявляти ділянки, де процеси відновлення йдуть повільно, та своєчасно вживати коригувальні заходи. Також доповнюється цей процес наземними обстеженнями, які дають змогу оцінити виживаність саджанців, виявити ураження хворобами, ерозію ґрунтів тощо.

Поступове відновлення Ізюмських лісів є важливим не лише з екологічної точки зору. Це має велике соціально-економічне значення для регіону. Відродження лісів сприяє стабілізації мікроклімату, покращенню якості повітря та води, відновленню родючості ґрунтів. До того ж, процес лісовідновлення створює нові робочі місця, активізує участь місцевих громад у природоохоронній діяльності та сприяє розвитку екологічної освіти [10].

Таким чином, результати дослідження не лише дозволяють об'єктивно оцінити екологічні наслідки війни, а й служать підґрунтям для стратегічного планування майбутнього Ізюмських лісів. Завдяки поєднанню сучасних технологій аналізу супутникових даних, ґрунтового наукового підходу та активної участі фахівців і місцевих громад, стає можливим не просто відновити знищені ліси, а й зробити їх більш стійкими до майбутніх викликів та екологічних загроз.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено комплексний аналіз стану рослинного покриву Ізюмських лісів у період з 2020 по 2024 рік з використанням супутникових знімків та спектральних індексів NDVI та NBR. Це дозволило простежити динаміку екологічних змін у регіоні, який зазнав інтенсивного військового впливу внаслідок повномасштабного вторгнення Російської Федерації на територію України.

У результаті дослідження були отримані наступні висновки:

1. Використання дистанційного зондування Землі є ключовим інструментом в умовах війни. Через фізичну небезпеку перебування на багатьох територіях, традиційні методи польового обстеження є неможливими. У таких умовах супутникові технології дозволяють здійснювати високоточний екологічний моніторинг, оперативно отримувати достовірну інформацію про стан довкілля та оцінювати наслідки руйнівних подій.

2. Виконана робота щодо використання спектральних індексів NDVI та NBR є ефективною для оцінки стану лісового покриву. NDVI дозволяє оцінити загальну «зеленість» рослинності, її щільність та фотосинтетичну активність, тоді як NBR є чутливим до змін, спричинених пожежами або деградацією біомаси. Поєднання цих індексів забезпечує комплексний підхід до виявлення пошкоджених територій.

3. Було виявлено значне погіршення стану Ізюмських лісів між 2020 та 2024 роками. На основі аналізу супутникових знімків встановлено суттєве зниження значень NDVI та NBR, особливо в центральній, південній і східній частинах лісового масиву. Ці зони зазнали найбільшого впливу бойових дій, зокрема артилерійських обстрілів, пожеж, вирубок, прокладання доріг для техніки та мінування.

4. Виконана робота, щодо створення комплексної карти змін NDVI-NBR дозволила просторово виділити зони різного ступеня деградації. На карті чітко

видно темно-червоні ділянки з катастрофічною втратою рослинності, жовті – із помірною деградацією, а зелені – з незначними змінами або відносно стабільним станом екосистем. Це дає змогу ефективно планувати заходи з відновлення.

Отримані результати мають прикладне значення. Вони можуть бути використані державними органами, лісовими господарствами, міжнародними партнерами та природоохоронними організаціями для:

- визначення масштабів екологічних збитків;
- планування розмінування та екологічної інвентаризації;
- розробки програм відновлення лісів та рекультивації пошкоджених земель;
- створення доказової бази для майбутніх міжнародних судових процесів щодо екоциду.

Методика дослідження може бути масштабована на інші регіони. Запропонований підхід може бути використаний для моніторингу стану рослинності в інших постраждалих територіях України (Святогірський ліс, Сіверський Донець, ліси Херсонщини, тощо), що дозволяє створити загальнонаціональну систему екомоніторингу в умовах війни.

Використання супутникових індексів сприяє екологічній трансформації системи управління природними ресурсами. Надалі важливо інтегрувати подібні дослідження в державну політику відновлення довкілля, а також у процеси адаптації до кліматичних змін та запобігання екологічним катастрофам.

Узагальнюючи, варто підкреслити, що дистанційне зондування Землі є невід’ємною складовою сучасного географічного і екологічного аналізу. У контексті війни цей метод дозволяє не лише фіксувати масштаби екологічних руйнувань, але й забезпечує основу для науково обґрунтованого відновлення природного середовища України. Робота демонструє реальні можливості поєднання науки, технологій і патріотичної відповідальності в боротьбі за збереження національних природних ресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Громадська організація “Українська природоохоронна група” : веб-сайт. URL: <https://uncsg.org.ua> (дата звернення : 23.04.2025)
2. Державна екологічна інспекція України : веб-сайт. URL: <https://www.dei.gov.ua/posts/2226> (дата звернення : 22.04.2025)
3. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Звіт про наслідки лісових пожеж у Харківській області : веб-сайт. URL: <https://dsns.gov.ua> (дата звернення : 22.04.2025)
4. Державне агентство водних ресурсів України : веб-сайт. URL: <https://www.davr.gov.ua> (дата звернення : 22.04.2025)
5. Державне агентство лісових ресурсів України : веб-сайт. URL: <https://forest.gov.ua> (дата звернення : 23.04.2025)
6. Вегетаційні індекси NDVI, EVI, GNDVI, CVI, True. URL: <https://www.soft.farm/uk/blog/vegetacijni-indeksi-ndvi-evi-gndvi-cvi-true-color-140> (дата звернення : 20.04.2025)
7. Величко О. М., Зеркалов Д. В. Екологічний моніторинг : навчальний посібник. К.: Науковий світ, 2001. 205 с.
8. Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи : збірник наукових праць (за матеріалами щорічної наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої пам’яті професора Г. П. Дубинського; 13 квітня 2023 року, м. Харків. Вип. 15. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2023. С. 68-70. URL: https://physgeo.univer.kharkov.ua/files/conference/stud_2023.pdf
9. Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи : збірник наукових праць (за матеріалами щорічної наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої пам’яті професора Г. П. Дубинського; 10 квітня 2025 року, м. Харків. Вип. 17. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. С. 95-98. URL: https://physgeo.univer.kharkov.ua/files/conference/stud_2025.pdf

10. Гнедіна К., Нагорний П. Загрози екологічній безпеці: реалії воєнного часу та економічне стимулювання повоєнного екологічного відновлення України. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2022. № 4 (32). С. 39 - 52.

11. Жежера В. П. Наслідки бойових дій для лісового фонду України. *Лісівництво і агролісомеліорація* : збірник наукових праць. 2023. № 144. С. 87 - 94.

12. Ізюмське лісове господарство. : веб-сайт. URL: http://iziumles.at.ua/index/pro_nashe_pidpriemstvo/0-67 (дата звернення : 19.04.2025)

13. Індокси розвитку рослин. URL: <https://propozitsiya.com/ua/indeksi-rozvitku-roslin> (дата звернення : 25.04.2025)

14. Ключові наслідки для довкілля від російської агресії в Україні 24 лютого - 31 березня 2022 року. URL: <https://web.archive.org/web/20220411230314/https://mepr.gov.ua/news/39097.html> (дата звернення : 25.04.2025)

15. Мартиненко К. Г. Екологічні наслідки війни в Україні: сучасний стан та виклики. *Екологічна безпека та збалансоване природокористування* : збірник наукових праць. 2023. № 1. С. 14-22.

16. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України : веб-сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/news/39684.html> (дата звернення : 21.04.2025)

17. Підрив Каховської ГЕС: трагедія, яка змінить сільське господарство півдня та всієї України. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3721075-pidriv-kahovskoi-ges-tragedia-aka-zminit-silске-gospodarstvo-pivdna-ta-vsiei-ukraini.html> (дата звернення : 21.04.2025)

18. План-схема лісу Ізюмського району вже у продажу. URL: <https://obrii.com.ua/info/38011-plan-shema-lisu-izyumskogo-rajonu-vzhe-u-prodazhu.html> (дата звернення : 01.05.2025)

19. Природа та війна: як військове вторгнення Росії впливає на довкілля України. URL: [colorhttps://ecoaction.org.ua/pryroda-ta-vijna.html](https://ecoaction.org.ua/pryroda-ta-vijna.html) (дата звернення : 22.05.2025)

20. Радченко О. С. Моніторинг деградації рослинного покриву за допомогою супутникових індексів. *Екологічні дослідження* : збірник наукових праць. 2022. № 1. С. 33–39.

21. Спаплюжена земля: поля у вирвах, вибухи й руйнування на супутникових знімках України. URL: <https://rudana.com.ua/news/spaplyuzhena-zemlya-polya-u-vyrvah-vybuhy-y-ruynuvannya-na-suputnykovykh-znimkah-ukrayiny> (дата звернення : 19.04.2025)

22. Шевченко Л. В. Аналіз вегетаційних змін з використанням супутникових індексів. *Наукові записки географічного факультету* : збірник наукових праць. 2022. № 58. С. 101–108.

23. Яворський, О. М. ГІС-технології у природоохоронних дослідженнях : навчальний посібник. Київ: Логос, 2020. 216 с.

24. 'An Ecocide': How the conflict in Ukraine is bombarding the environment. URL: <https://www.trtworld.com/magazine/an-ecocide-how-the-conflict-in-ukraine-is-bombarding-the-environment-56730> (дата звернення : 19.04.2025)

25. Anthes Emily. A 'Silent Victim': How Nature Becomes a Casualty of War. The New York Times. Translated by Kinsella, Ali. New York, USA. URL: <https://www.nytimes.com/2022/04/13/science/war-environmental-impact-ukraine.html> (дата звернення : 19.04.2025)

26. Assessing the environmental impacts of the war in Ukraine. URL: <http://wwfcee.org/our-offices/ukraine/assessing-the-environmental-impacts-of-the-war-in-ukraine> (дата звернення : 20.04.2025)

27. Assess vegetation with VARI in Site Scan URL: <https://community.esri.com/> (дата звернення : 15.04.2025)

28. Ayesha Rascoe, Carroll Muffett. How the war in Ukraine affects the environment. URL: <https://www.npr.org/2022/04/24/1094538498/how-the-war-in>

ukraine-affects-the-environment (дата звернення : 19.04.2025)

29. Bondarenko O. L. Satellite Data-Based Environmental Damage Assessment in Eastern Ukraine // Ukrainian Journal of Remote Sensing. – 2023. – Vol. 4, №2. – P. 55–64.

30. Braun Stuart. Ukraine war threatens climate targets. Deutsche Welle. URL: <https://www.dw.com/en/ukraine-war-threatens-climate-targets/a-62185483> (дата звернення : 19.04.2025)

31. Environment and Conflict Alert Ukraine: A first glimpse of the toxic toll of Russia's invasion of Ukraine. URL: <https://paxforpeace.nl/news/environment-and-conflict-alert-ukraine-a-first-glimpse-of-the-toxic-toll-of-russias-invasion-of-ukraine/> (дата звернення : 21.04.2025)

32. Genevieve Kotarska, Lauren Young. Green Insecurity: The Environmental Costs of War in Ukraine. URL: <https://rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/green-insecurity-environmental-costs-war-ukraine> (дата звернення : 26.04.2025)

33. Gigova Radina. Russia is accused of 'ecocide' in Ukraine. But what does that mean? URL: <https://www.cnn.com/2023/07/02/world/ukraine-ecocide-dam-collapse-crime-climate-intl-cmd/index.html> (дата звернення : 26.04.2025)

34. How war in Tigray is threatening the success of restoration-based agriculture. URL: <https://ceobs.org/how-war-in-tigray-is-threatening-the-success-of-restoration-based-agriculture/> (дата звернення : 15.04.2025)

35. Jones Benji. The pollution from Russia's war will poison Ukraine for decades. Vox. Retrieved URL: <https://www.vox.com/down-to-earth/2022/6/2/23143250/ukraine-russia-war-pollution-emissions-environment> (дата звернення : 21.04.2025)

36. Kateryna Gorbenko. Nationally rare plants destroyed under the wheels of Russian army vehicles. Nature Reserve Fund of Ukraine. URL: <https://wownature.in.ua/en/nationally-rare-plants-destroyed-under-the-wheels-of-russian-army-vehicles/> (дата звернення : 18.04.2025)

37. Kottasová Ivana. Ukraine's natural environment is another casualty of war. The damage could be felt for decades. URL: <https://edition.cnn.com/2022/05/22/europe/ukraine-russia-war-environment-intl-cmd/index.html> (дата звернення : 28.04.2025)

38. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index URL: <https://eos.com/make-an-analysis/ndvi/> (дата звернення : 15.04.2025)

39. New Lines Institute. An Atlas of the War in Ukraine: Military, Political, and Humanitarian Dimensions. URL: <https://newlinesinstitute.org> (дата звернення: 16.04.2025)

40. Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index for Sentinel-2 Imagery URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1727> (дата звернення : 15.04.2025)

41. OSINT Forest Area Tracker URL: <https://osintmapping.users.earthengine.app/view/osint-forest-area-tracker> (дата звернення : 23.04.2025)

42. Roscini Flavia. The Environmental Cost of the War in Ukraine. URL: <https://www.irreview.org/articles/the-environmental-cost-of-the-war-in-ukraine> (дата звернення : 28.04.2025)

43. Sentinel-5P URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/copernicus/sentinel-5p> (дата звернення : 23.04.2025)

44. Sentinel Hub EO Browser URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (дата звернення : 10.04.2025)

45. The Enhanced Vegetation Index (EVI) as a proxy for diet quality and composition in a mountain ungulate URL: https://www.researchgate.net/figure/Seasonal-trends-of-the-Enhanced-Vegetation-Index-EVI-in-FSNGR-Three-periods-were_fig2_283855673 (дата звернення : 21.04.2025)

46. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine URL: <https://occup-med.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12995-023-00398-y> (дата

звернення : 25.04.2025)

47. Ukraine invasion rapid overview of environmental issues URL: <https://ceobs.org/ukraine-invasion-rapid-overview-of-environmental-issues/> (дата звернення : 28.04.2025)

48. Understanding Indigenous Farming Systems in Response to Climate Change: An Investigation into Soil Erosion in the Mountainous Regions of Central Vietnam URL: https://www.researchgate.net/figure/The-Enhanced-Vegetation-Index-EVI-map-of-IK-and-NIK-farming-system-areas_fig5_343262950 (дата звернення : 25.04.2025)

49. Vanessa Montalbano, Maxine Joselow. War in Ukraine poses environmental risk now and in the future, advocates say. URL: <https://www.washingtonpost.com/politics/2022/04/19/war-ukraine-poses-environmental-risk-now-future-advocates-say/> (дата звернення : 21.04.2025)

50. Vegetation Indices. URL: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/VegetationIndices.html> . (дата звернення : 25.04.2025)

51. Velázquez Jaime. The climate crisis and the invasion of Ukraine 'have the same roots', says expert. URL: <https://www.euronews.com/green/2022/03/22/the-climate-crisis-and-the-invasion-of-ukraine-have-the-same-roots-says-expert> (дата звернення : 25.04.2025)

52. Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) URL: <https://www.space4water.org/space/visible-atmospherically-resistant-index-vari> (дата звернення : 19.04.2025)

53. Will Kakhovka Dam destruction make 'ecocide' a global crime? URL: <https://www.opendemocracy.net/en/odr/ukraine-war-kakhovka-dam-ecocide-international-law/> (дата звернення : 21.04.2025)