

## Деградація екосистем у Харківській області під час війни: спутниковий аналіз

**Олена Крайнюк<sup>1</sup>**

к. техн. н., доцент кафедри метрології та безпеки життєдіяльності,

<sup>1</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,

e-mail: [alenuvarova@ukr.net](mailto:alenuvarova@ukr.net), [id https://orcid.org/0000-0001-9524-040X](https://orcid.org/0000-0001-9524-040X);

**Юрій Буц<sup>2</sup>**

д. техн. н., професор, зав. кафедри охорони праці та навколишнього середовища,

<sup>2</sup> Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,

e-mail: [butsyura@ukr.net](mailto:butsyura@ukr.net), [id https://orcid.org/0000-0003-0450-2617](https://orcid.org/0000-0003-0450-2617);

**Віталій Барбашин<sup>3</sup>**

к. техн. н., доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності,

<sup>3</sup> Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків, Україна,

e-mail: [barbachyn@ukr.net](mailto:barbachyn@ukr.net), [id https://orcid.org/0000-0003-3262-8305](https://orcid.org/0000-0003-3262-8305);

**Ольга Нікітченко<sup>3</sup>**

к. техн. н., доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності,

e-mail: [olganikitchenko369@gmail.com](mailto:olganikitchenko369@gmail.com), [id https://orcid.org/0009-0007-1313-2191](https://orcid.org/0009-0007-1313-2191);

**Валерій Сухов<sup>4</sup>**

к. геол. н., завідувач кафедри фундаментальної та прикладної геології,

<sup>4</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,

e-mail: [donsanchos77@gmail.com](mailto:donsanchos77@gmail.com), [id https://orcid.org/0000-0001-5784-5248](https://orcid.org/0000-0001-5784-5248)

Військові дії на сході України, зокрема в Харківській області, призвели до значних екологічних наслідків. Зокрема, зміни в екосистемах, спричинені бойовими діями та пожежами, вимагають ретельного моніторингу для оцінки ступеня деградації та планування заходів щодо відновлення. Важливо розробити методи оцінки змін в екосистемах регіону для формування стратегії екологічної реабілітації. Дослідження спрямоване на комплексний аналіз впливу військових дій на екосистеми Харківської області, зокрема в Куп'янському та Ізюмському районах. Основною метою є оцінка змін у рослинному покриві за допомогою супутникових даних та індексу нормалізованої різниці вегетації (NDVI), що дозволить виявити найбільш постраждалі території та оцінити потенціал їх відновлення. Результати базуються на використанні супутникових знімків платформи Copernicus Sentinel-2 для аналізу NDVI. Середні та максимальні значення індексу були використані для виявлення змін у рослинному покриві в період з 2021 по 2024 роки. Методологія включає побудову карт змін вегетації, порівняння середніх значень NDVI між роками та використання географічних інформаційних систем (ГІС) для візуалізації даних. В ході дослідження виявлено значне зниження показників NDVI у Куп'янському та Ізюмському районах у 2022 році, що свідчить про серйозні екологічні наслідки бойових дій. Зокрема, NDVI у 2022 році показав падіння на 48% порівняно з 2021 роком, що вказує на деградацію рослинного покриву. У 2024 році спостерігається часткове відновлення, проте рівень NDVI залишається нижчим за довоєнний час. Результати дослідження показують суттєву деградацію екосистем через військові дії, зокрема через лісові пожежі та руйнування природних ландшафтів. Це надає критично важливу інформацію для планування подальших заходів з відновлення та реабілітації природних територій. Рекомендується продовжити моніторинг стану екосистем із використанням супутникових технологій та розробити програму екологічного відновлення, що включатиме заліснення та очищення постраждалих земель.

**Ключові слова:** екологічні наслідки війни, NDVI, супутниковий моніторинг, деградація рослинного покриву, супутникові знімки Sentinel-2, геоінформаційні системи (ГІС), екологічна реабілітація.

**Як цитувати:** Крайнюк Олена. Деградація екосистем у Харківській області під час війни: супутниковий аналіз / Олена Крайнюк, Юрій Буц, Віталій Барбашин, Ольга Нікітченко, Валерій Сухов // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 329-343. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26>

**In cites:** Krainiuk Olena, Buts Yuriy, Barbashyn Vitalii, Nikitchenko Olga, Sukhov Valerii (2024). Ecosystem degradation in Kharkiv region during the war: satellite analysis. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 329-343. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26> [in Ukrainian]

**Постановка проблеми.** Війна в Україні, яка розпочалася в 2014 році та загострилася з початком повномасштабного вторгнення у 2022 році, має серйозні наслідки не лише для людського населення, а й для довкілля. Військові дії супроводжуються руйнуванням інфраструктури, масштабними пожежами, забрудненням ґрунтів і вод, а

також знищенням рослинного покриву. Екосистеми регіонів, де ведуться бойові дії, піддаються значним навантаженням, що може призвести до довгострокових змін у їх структурі та функціонуванні.

Особливо важливою є оцінка впливу війни на довкілля у східних та південно-східних регіонах

України, зокрема в Харківській області, яка стала ареною активних бойових дій. З огляду на стратегічне розташування та наявність значних лісових масивів, Харківська область зазнала суттєвих змін, які вплинули на її екосистеми.

Актуальність даного дослідження полягає у необхідності моніторингу екологічного стану регіону, оскільки такі зміни можуть мати довготривалі наслідки для біорізноманіття, стану ґрунтів, водних ресурсів та можливостей відновлення рослинного покриву. Використання сучасних супутникових технологій, зокрема аналізу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), дозволяє оцінити масштаб і характер змін в екосистемах Харківської області під час війни.

**Мета дослідження.** Метою наукового дослідження є комплексна оцінка впливу військових дій на екосистеми Харківської області на основі супутникових даних та аналізу змін у рослинному покриві, зокрема на прикладі земель поблизу м. Ізюм та м. Куп'янськ. Це дозволить не лише зафіксувати ступінь деградації, а й оцінити потенціал для майбутнього відновлення природних екосистем регіону.

Предметом дослідження є зміни в екосистемах Харківської області, зокрема у рослинному покриві, під впливом військових дій. Дослідження зосереджується на використанні супутникових даних та індексу нормалізованої різниці вегетації (NDVI) для оцінки ступеня деградації та потенціалу відновлення природних територій в околицях міст Ізюм та Куп'янськ Харківського регіону.

**Матеріали і методи досліджень.** Для вивчення впливу військових дій на екосистеми Харківської області було використано комплексний підхід, який включає застосування сучасних методів супутникового моніторингу та аналізу даних, дослідження індексу нормалізованої різниці вегетації (NDVI) та аналіз геопросторових даних.

Використаний супутниковий моніторинг як один з найефективніших методів аналізу забруднення навколишнього природного середовища, особливо в контексті оцінки впливу лісових пожеж. Основними джерелами для моніторингу є супутники програм Sentinel (Copernicus), Landsat (NASA/USGS) та MODIS (NASA). Ці супутники оснащені спеціальними датчиками, що дозволяють вимірювати різні спектральні характеристики, включаючи інфрачервоне, видиме та ультрафіолетове випромінювання. Супутник Sentinel-2 – це частина програми Європейського Союзу Copernicus, яка спрямована на моніторинг Землі та навколишнього середовища. Sentinel-2 складається з двох супутників (Sentinel-2A та Sentinel-2B), які працюють у тандемі, забезпечуючи отримання високоякісних зображень з частотою 5

днів. Супутники обладнані оптичними сенсорами MultiSpectral Instrument (MSI), які збирають дані в 13 спектральних діапазонах – від видимого світла до ближнього інфрачервоного. Супутники Sentinel-2 характеризуються високою просторово-часовою роздільною здатністю (10–60 м в залежності від каналу); постійним і безкоштовним доступом до даних через відкриті платформи, такі як Copernicus Open Access Hub та EO Browser; можливістю моніторингу різних аспектів екосистеми, включаючи рослинний покрив, водні ресурси, ґрунти та атмосферні явища. Платформа Copernicus EO Browser надає доступ до великого обсягу супутникових знімків, які дозволяють аналізувати зміни у землекористуванні, вегетаційному покриві та стані екосистеми. За допомогою супутникових даних Sentinel-2, які знімають у видимому та інфрачервоному спектрі, виявлено зміни в рослинному покриві та ідентифіковано ділянки, які зазнали значних ушкоджень внаслідок військових дій.

Для аналізу знімків і моніторингу рослинного покриву використано нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI) – один із найпоширеніших вегетаційних індексів, що застосовується для оцінки стану рослинності. Це один з основних інструментів для оцінки змін у рослинному покриві. Використовуючи NDVI, можна проаналізувати стан рослинності, порівнюючи зображення до і після лісових пожеж або впливу іншого фактору. Високі значення NDVI вказують на густу, активну рослинність, тоді як низькі свідчать про пошкодження або її відсутність. Дистанційне зондування дозволяє відстежувати зміни у типах земельного покриву, таких як перетворення лісів на спалені ділянки. Це допомагає оцінити загальні екологічні втрати та відновлювальні процеси. За допомогою супутникового моніторингу є можливість збирати дані на регулярній основі, що дозволяє створювати динамічні карти змін навколишнього природного середовища та відстежувати відновлення після лісових пожеж.

NDVI розраховується на основі різниці між відбиттям світла в червоному спектрі (Red) та ближньому інфрачервоному спектрі (NIR):

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

де NIR (near-infrared) – відбиття ближнього інфрачервоного світла, яке рослини активно відбивають;

Red – відбиття червоного світла, яке рослини переважно поглинають для фотосинтезу.

NDVI дозволяє кількісно оцінити стан рослинності на великих територіях і в різні часові періоди. Значення NDVI змінюються від -1 до +1:

- високі значення NDVI (0,6–0,9) свідчать про густий і здоровий рослинний покрив;

- низькі значення NDVI (0,2–0,4) вказують на деградовану або пошкоджену рослинність;

- значення, близькі до нуля або негативні, вказують на відсутність рослинного покриву (водні об'єкти, не засаджені ґрунти або міські території).

Індекс NDVI застосовується для оцінки впливу різних факторів на рослинність, а саме для вивчення впливу лісових пожеж. NDVI може виявити пошкодження рослинного покриву, спричинені пожежами. Порівняння NDVI до і після пожежі дає змогу оцінити площу пошкоджених ділянок і ступінь відновлення.

В умовах воєнних дій на території України, зокрема в Харківській області, моніторинг стану рослинного покриву є критично важливим для оцінки екологічних наслідків. Лісові пожежі, вирубка лісів та інші руйнівні фактори можуть значно вплинути на екосистему. Використання супутникових зображень Sentinel-2 разом із NDVI дозволяє:

- виявляти знищення рослинного покриву через бойові дії або інші техногенні чинники;
- стежити за відновленням екосистеми після військових конфліктів;
- проводити регулярний моніторинг земель, що зазнали впливу лісових пожеж або інших екологічних катастроф.

Таким чином, супутникові дані Sentinel-2 та індекс NDVI є важливими інструментами для оцінки стану рослинності та виявлення змін у довкіллі внаслідок як природних чи антропогенних факторів, так і при дослідженні впливу бойових дій на екосистему. Перевагами вибраного методу є значне охоплення території, що дозволяє аналізувати навіть важкодоступні місця; можливість швидко отримати актуальні дані; отримання кількісної інформації (площа ушкодженої рослинності), оцінка змін у часі, тощо.

Для аналізу та візуалізації зібраних даних використовувалися географічні інформаційні системи (ГІС). ГІС допомагають інтегрувати різні типи даних, включаючи супутникові знімки, топографічні карти та інші джерела геопросторової інформації. Це дозволяє створити комплексну картину змін у екосистемі та виявити найбільш постраждалі райони.

Ця методологія забезпечує комплексний підхід до оцінки впливу військових дій на екосистему та дозволяє розробити ефективні стратегії для відновлення постраждалих територій.

**Опис регіону дослідження.** Дослідження проводилося у Куп'янському та Ізюмському районах Харківської області. Ці райони були обрані через значні пошкодження інфраструктури та природних комплексів внаслідок військових дій. Географічні та екологічні особливості цих райо-

нів було враховано при аналізі зібраних даних. Куп'янський та Ізюмський райони розташовані в Харківській області, на сході України. Цей регіон характеризується помірно-континентальним кліматом із чітко вираженими сезонами: теплим літом та холодною зимою. Середньорічна температура коливається від +7 до +8°C, а середньорічна кількість опадів становить близько 500-600 мм. Куп'янський район має переважно рівнинний рельєф із невеликими пагорбами та долинами, тоді як Ізюмський район характеризується більш вираженим рельєфом із великою кількістю ярів та височин. Регіон перетинається численними річками, серед яких найбільшими є Оскіл та Сіверський Донець. Ці водні артерії відіграють важливу роль у підтримці місцевих екосистем і забезпеченні водними ресурсами. Ці райони багаті на лісові масиви та сільськогосподарські угіддя. Основні типи рослинності включають широколистяні та мішані ліси, степи, а також культурні ландшафти з полями зернових та олійних культур. Лісові масиви забезпечують притулок для різноманітних видів флори та фауни, багато з яких є ендемічними для цього регіону. Проте війна суттєво вплинула на природні комплекси, зокрема на ліси, які постраждали від пожеж та військових дій.

Куп'янський район Харківської області зазнав значних руйнувань та втрат внаслідок військових дій. Російські війська неодноразово обстрілювали цей район, завдаючи шкоди інфраструктурі та житловим будинкам. Внаслідок обстрілів постраждали як цивільні особи, так і об'єкти критичної інфраструктури. Військові дії в Куп'янському районі призвели до значних екологічних наслідків. Лісові масиви, які раніше були важливими екосистемами, зазнали серйозних ушкоджень через пожежі, спричинені обстрілами. Це призвело до втрати біорізноманіття та деградації ґрунтів. Відновлення цих територій вимагатиме значних зусиль та часу.

Ізюмський район також зазнав значних втрат і руйнувань. Місто Ізюм було окуповане російськими військами з квітня 2022 року до вересня 2022 року. За цей час місто зазнало численних авіаударів та артилерійських обстрілів, що призвело до значних руйнувань інфраструктури та житлових будинків. Внаслідок обстрілів касетними боеприпасами загинули цивільні особи та було поранено багато людей. Ці події мали значний вплив на екосистему регіону, зокрема на лісові масиви, які постраждали від пожеж та руйнувань. Окрім руйнувань інфраструктури, військові дії спричинили значні екологічні проблеми. Лісові пожежі, викликані обстрілами, знищили значні площі лісів, що призвело до втрати середовища існування для багатьох видів тварин та рослин. Крім того, забруднення ґрунтів та водних ресурсів

через використання важкої техніки та боеприпасів створило додаткові виклики для відновлення екосистеми.

Ці події підкреслюють важливість використання сучасних методів моніторингу та аналізу для оцінки впливу військових дій на екосистему. Супутникові дані та індекс NDVI є важливими інструментами для виявлення та оцінки ушкоджень, а також для планування заходів з відновлення постраждалих територій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Війна в Україні, розпочата росією, має значні екологічні наслідки, які впливають на природне середовище, здоров'я людей та глобальну екологічну безпеку. Ці наслідки включають забруднення води, ґрунту, повітря, руйнування екосистем та загрозу біорізноманіттю.

Ліси України пошкоджуються пожежами, вибухами, порушенням ґрунту та пересуванням техніки. Понад 3 мільйони гектарів українських лісів постраждали, найбільше - Чернігівська, Сумська, Луганська, Київська, Житомирська та Харківська області [1]. Кількість пожеж потроїлася порівняно з минулими роками, часто через обстріли. Відновлення цих лісів займе десятиліття. Ключові виклики включають адаптацію до зміни клімату, боротьбу з інвазивними видами та управління ризиком пожеж. Війна загострила існуючі виклики, такі як зміна клімату, що підвищило ризик посух, шкідників та лісових пожеж. Ретельне планування та пріоритизація відновлення природних екосистем будуть вирішальними для повонесних зусиль України з відновлення цих земель.

Військові дії призвели до значного забруднення водних ресурсів та ґрунтів, що становить небезпеку для здоров'я людей та екосистем [2, 3].

Війна спричинила масштабні зміни та руйнування природних ландшафтів, включаючи ліси, степи та інші природні зони, що загрожує біорізноманіттю [4, 5].

Постійні пожежі, вибухи на промислових об'єктах та витіки шкідливих речовин у повітря призвели до значного забруднення атмосфери [6].

Захоплення та порушення правил експлуатації радіаційних об'єктів створюють серйозну загрозу радіаційної безпеки [3].

Дії окупантів кваліфікуються як екоцид, що включає забруднення водних об'єктів, руйнування екосистем та інші екологічні злочини [7].

Війна призвела до зменшення обсягів виробництва сільськогосподарської продукції, що вплинуло на продовольчу безпеку як в Україні, так і в інших країнах [8, 9].

Війна в Україні має серйозні екологічні наслідки [10-13], які включають забруднення води, ґрунту та повітря, руйнування природних ландшафтів та загрозу біорізноманіттю. Ці наслідки

впливають не лише на Україну, але й на глобальну екологічну безпеку. Важливо вживати заходів для оцінки та мінімізації цих наслідків, а також залучати міжнародну спільноту до відновлення екологічної безпеки.

Військові дії призводять до руйнування лісів, степів і природних ландшафтів, що загрожує рідкісним видам рослин і тварин, а також порушує екосистеми [21]. Військові дії призводять до руйнування лісових ландшафтів, включно з вирубкою дерев, руйнуванням ґрунтового покриву і зміною рельєфу для будівництва укріплень. Унаслідок бойових дій у Донецькій і Харківській областях постраждали значні площі лісів і заповідників, що підтверджується даними дистанційного зондування [22, 23].

Унаслідок бойових дій постраждали об'єкти природно-заповідного фонду, такі як Чорноморський біосферний заповідник і Національний природний парк «Білобережжя Святослава» [19, 21].

Існує загроза ядерної катастрофи та підйом радіоактивного пилу внаслідок руху важкої техніки в зоні Чорнобиля та ударів по ядерних об'єктах [17]. Руйнування хімічних підприємств і складів нафтопродуктів призводить до викиду токсичних речовин у навколишнє середовище [18].

Відновлення природних екосистем займе десятиліття, а наслідки воєнних дій відчуватимуться ще довго після їх завершення [19, 20]. Збитки від екологічних злочинів росіян в Україні становлять понад 56 млрд. дол. [24].

Інтеграція правового захисту довкілля в доктрину збройних сил і спрямування ресурсів і досвіду на підтримку постраждалих громад можуть допомогти знизити шкоду, яку завдають довкіллю під час збройних конфліктів [14]. Для ефективнішого захисту навколишнього природного середовища під час збройних конфліктів необхідний новий правовий підхід, що визнає неподільність здорового довкілля та його важливість для виживання нинішнього і майбутніх поколінь [15].

У міжнародному праві передбачено спеціальні норми щодо захисту довкілля під час збройних конфліктів, однак для посилення захисту та забезпечення виживання цивільного населення необхідні більша ясність і розробка договірних правил [16].

Військові дії в Україні завдають значної шкоди навколишньому середовищу, зачіпаючи екосистеми, біорізноманіття, якість повітря і води, а також ґрунтові ресурси. Ці наслідки вимагають комплексного підходу до оцінки та відновлення, а також міжнародного співробітництва для мінімізації екологічних ризиків і забезпечення сталого розвитку в поствоєнний період.

**Порівняння NDVI у різні періоди для оцінки змін у стані рослинності (район м.**

**Куп'янськ).** Дослідження гістограм NDVI для району Куп'янська за 2021, 2022 і 2024 роки, отримані за допомогою супутникових знімків (рис. 1), підтверджують вплив бойових дій на екосистеми. Розраховано середні значення NDVI і стандартні відхилення для кожного року на основі даних і побудовано графік, що показує зміну NDVI в часі (рис. 2). На наведених графіках зображені розподіли індексу NDVI для регіону поблизу міста Куп'янськ у Харківській області, отримані на основі супутникових знімків за три різні дати: 15 вересня 2021 року, 15 вересня 2022 року та 19 вересня 2024 року.

По горизонтальній осі (рис. 1) відображені значення індексу NDVI, який коливається в межах від -1 до +1. Вищі значення NDVI (ближче до 1) свідчать про наявність густої і здорової рослинності, тоді як нижчі значення (ближче до -1) свідчать про відсутність рослинності або сильні пошкодження. По вертикальній осі (Frequency) відображено кількість пікселів на знімку, які мають відповідне значення NDVI. Чим вища частота (кількість), тим більше площа території з відповідним рівнем рослинного покриву.

На графіку за 2021 рік (15.09.2021) максимум частоти спостерігається для значень NDVI в межах від 0.2 до 0.5. Це свідчить про помірний рівень рослинності, з переважно здоровим покривом, що типово для кінця літа – початку осені.

На графіку за 2022 рік (15.09.2022) видно значний зсув до нижчих значень NDVI. Пік розподілу розташований в районі значень 0.1–0.4, що свідчить про ослаблення або деградацію рослинного покриву. Вірогідно це пов'язано із бойовими діями, що призвели до пошкодження екосистеми.

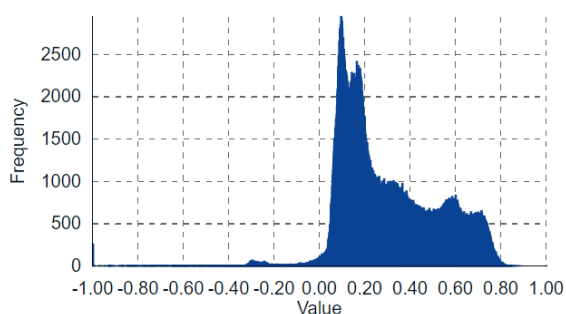
На графіку за 2024 рік (19.09.2024) відмічено відновлення, хоча пік NDVI знаходиться в діапазоні 0.2–0.5. Проте загальний рівень NDVI залишається нижчим порівняно з показниками 2021 року, що може свідчити про поступове відновлення рослинності після бойових дій, але ще не достатнє.

Діаграма розсіювання показує зміну середнього значення NDVI для району Куп'янська з 2021 по 2024 роки. Середні значення NDVI за 2021, 2022 та 2024 відповідно становлять: 0.35, 0.10 та 0.20 (рис. 2). Стандартні відхилення за ці ж роки: 0.15, 0.18 та 0.17. Аналіз відсоткової зміни NDVI показує:

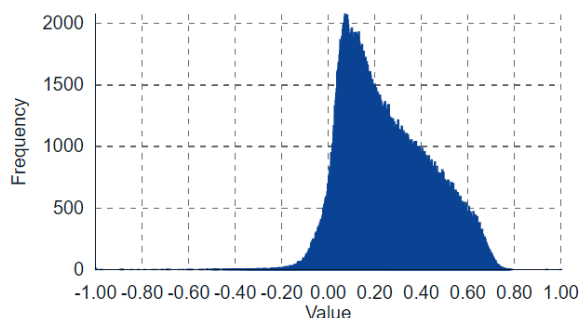
- Зниження NDVI з 2021 до 2022 року становить -71.43%. Це значне падіння, яке вказує на сильне пошкодження рослинності внаслідок військових дій і пожеж.

- Зміни з 2021 до 2024 року: -42.86%. Незважаючи на деяке зростання після 2022 року, рівень NDVI залишається нижчим за значення 2021 року, що свідчить про триваючий вплив на екологічну систему.

Sentinel-2 L1C - NDVI 15.09.2021



Sentinel-2 L1C - NDVI 15.09.2022



Sentinel-2 L1C - NDVI 19.09.2024

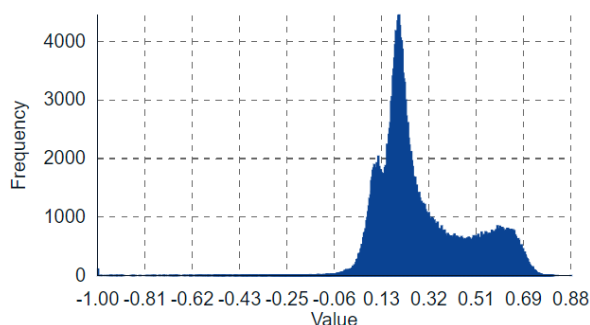


Рис. 1. Дослідження індексу NDVI за космічними знімками у районі Куп'янську Харківській області / Fig. 1. Investigation of the NDVI index using satellite images in Kupiansk district of Kharkiv region

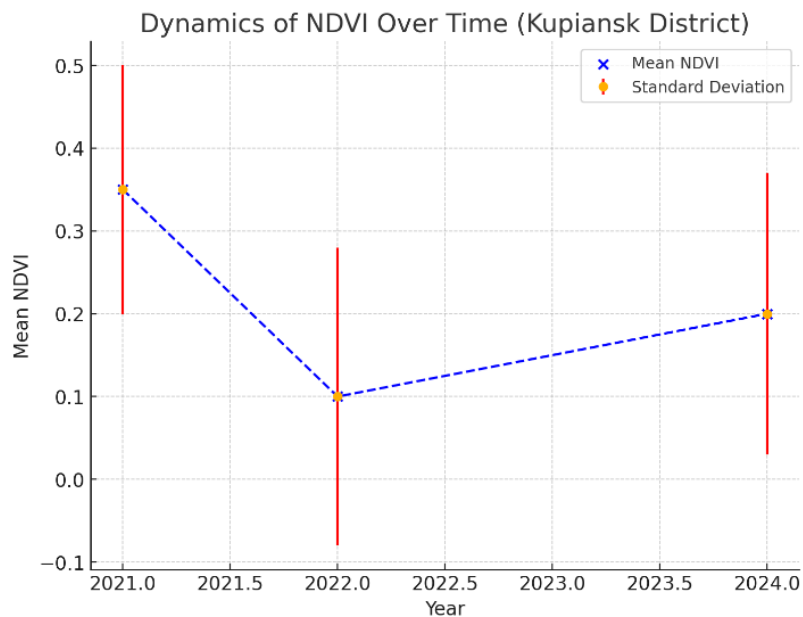


Рис. 2. Динаміка зміни середнього значення NDVI у часі (район Купянська, Харківська область) /  
Fig. 2. Dynamics of changes in the average NDVI value over time (Kupiansk district, Kharkiv region)

Яскраво демонструє зменшення рослинності порівняльна гістограма розподілу NDVI (рис. 3): NDVI 2021 року має більший пік ближче до позитивних значень, тоді як розподіли за 2022 і 2024 роки зміщені ближче до 0, що свідчить про менший вегетативний покрив у ці роки. Цей графік відображає порівняння розподілу значень індексу NDVI для трьох різних років: 2021, 2022 та 2024. Його можна використовувати для аналізу змін у рослинному покриві за цей період. По горизонталі відкладено значення NDVI, які коливаються від -0.4 до 0.8. Значення NDVI є числовим показником густоти рослинного покриву. Вищі значення NDVI (ближче до 0.8) свідчать про густіший та життєздатний рослинний покрив, де рослини здорові та активно фотосинтезують.

Нижчі значення NDVI (ближче до 0 або навіть негативних значень) вказують на деградацію або відсутність рослинності. Це може свідчити про мертву рослинність або вплив негативних факторів, таких як лісові пожежі, бойові дії або засуха. По вертикалі (вісь Y) представлена частота значень (Density), тобто скільки разів певне значення NDVI зустрічається у відповідному році. Чим вище стовпчик, тим частіше зустрічаються ці значення NDVI у вибраний рік.

Аналіз гістограми дає можливість зробити такі висновки (рис. 3):

- Зелений розподіл NDVI (2021 рік) – більшість значень NDVI знаходяться у діапазоні від 0.2 до 0.6. Це свідчить про стабільний рослинний покрив, що був життєздатним у цей рік.

- Червоний розподіл NDVI (2022 рік) – розподіл зміщений вліво, з найбільшою частотою значень NDVI ближче до 0. Це свідчить про знач-

не зниження густоти рослинного покриву в порівнянні з 2021 роком. Можливо, це результат бойових дій чи інших екологічних катастроф.

- Синій розподіл NDVI (2024 рік) – продовжується тенденція зниження NDVI. Більшість значень знаходиться в діапазоні від 0 до 0.3, що свідчить про пошкоджений або навіть відсутній рослинний покрив. Це може бути наслідком тривалого впливу бойових дій та погіршення екологічної ситуації в регіоні.

Таким чином, на графіку чітко видно, як NDVI зменшується з 2021 по 2024 роки. Це може вказувати на значне погіршення стану рослинного покриву в регіоні, ймовірно, через вплив бойових дій. У 2021 році рослинність була в більш життєздатному стані, але у 2022 і 2024 роках спостерігається різке зниження кількості здорових рослин, що може бути пов'язано з лісовими пожежами, військовими діями або іншими екологічними факторами. Ці дані є корисними для моніторингу екологічних наслідків війни та планування заходів із відновлення екосистем.

**Порівняння NDVI у різні періоди для оцінки змін у стані рослинності (район м. Ізюм).** Аналогічним чином досліджуємо супутникові знімки району міста Ізюм (рис. 4). На графіках (рис. 5) показано розподіл NDVI за 2021, 2022 і 2024 роки.

Діаграма розсіювання показує динаміку середнього значення NDVI з 2021 по 2024 роки, яке становить для 2021, 2022 та 2024 року: 0.39, 0.20 та 0.29 відповідно (рис. 6). Стандартне відхилення: 0.15, 0.19 та 0.17. Гістограми дають можливість проаналізувати відсоткову зміну середнього значення NDVI:

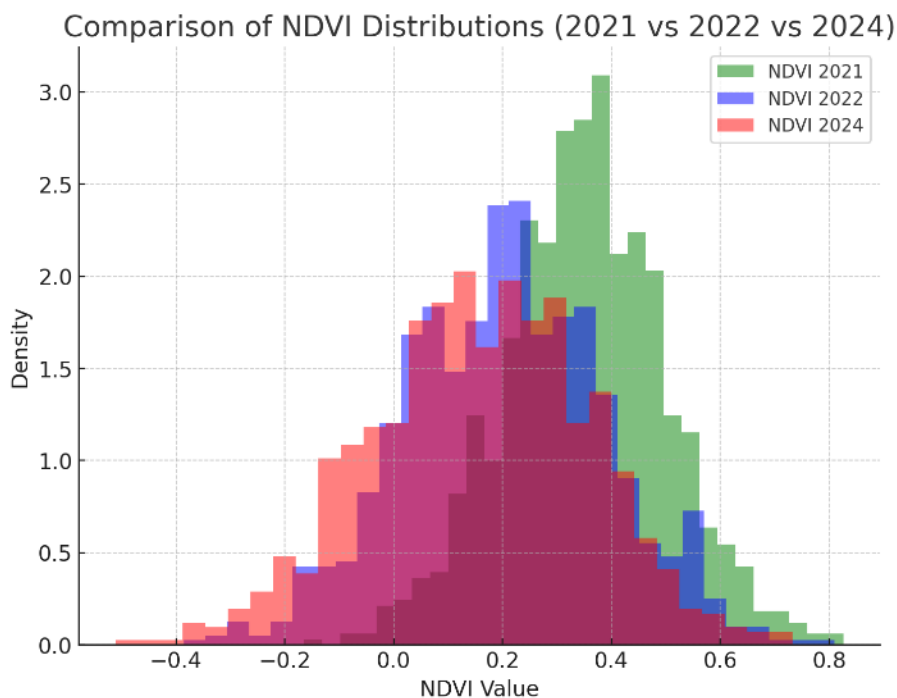


Рис. 3. Порівняння розподілу індексу NDVI для 2021, 2022 та 2024 років у районі Купянську Харківської області /  
Fig. 3. Comparison of the distribution of the NDVI index for 2021, 2022 and 2024 in the Kupiansk district of Kharkiv region

- Падіння з 2021 до 2022 року становить - 48.44%. Це значне зниження, що вказує на серйозні пошкодження рослинності, ймовірно, спричинені воєнними діями та пожежами.

- Відновлення з 2021 до 2024 року -26.05%. Незважаючи на часткове відновлення, рівень NDVI залишається нижчим, ніж 2021 року, що вказує на триваючий вплив на екологічну систему.

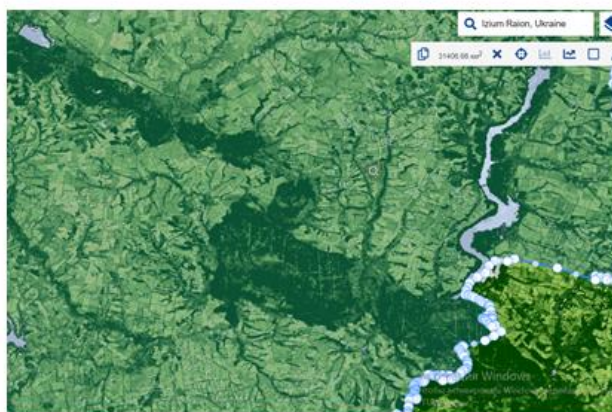
Порівняльна гістограма (рис. 7) дає підстави для наступного аналізу:

- 2021 рік (зелений). Цього року значення NDVI здебільшого перебувають у позитивному діапазоні (від 0.2 до 0.6), що вказує на життєздатну рослинність. Це контрольний стан

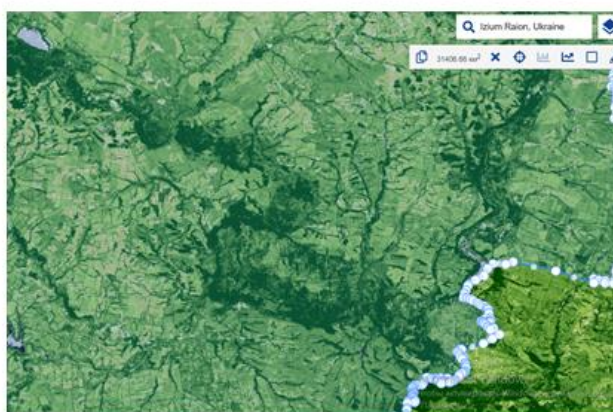
до початку інтенсивних військових дій.

- 2022 рік (синій). Видно, що значення NDVI зміщуються в бік менших значень і мають більше від'ємних значень порівняно з 2021 роком. Це може вказувати на пошкодження рослинності, спричинене військовими діями або пожежами.

2024 рік (червоний). Значення NDVI залишаються нижчими, ніж у 2021 році, але дещо вищими, ніж у 2022 році, що може свідчити про часткове відновлення рослинності. Проте щільність у діапазоні від 0 до 0.2 залишається високою, що вказує на пошкодження, що залишилися або наслідки пожеж.



2021



2024

Рис. 4. Супутникові знімки в районі міста Ізюм Харківської області за 2021 та 2024 роки /  
Fig. 4. Satellite imagery of the Izyum district of Kharkiv region for 2021 and 2024

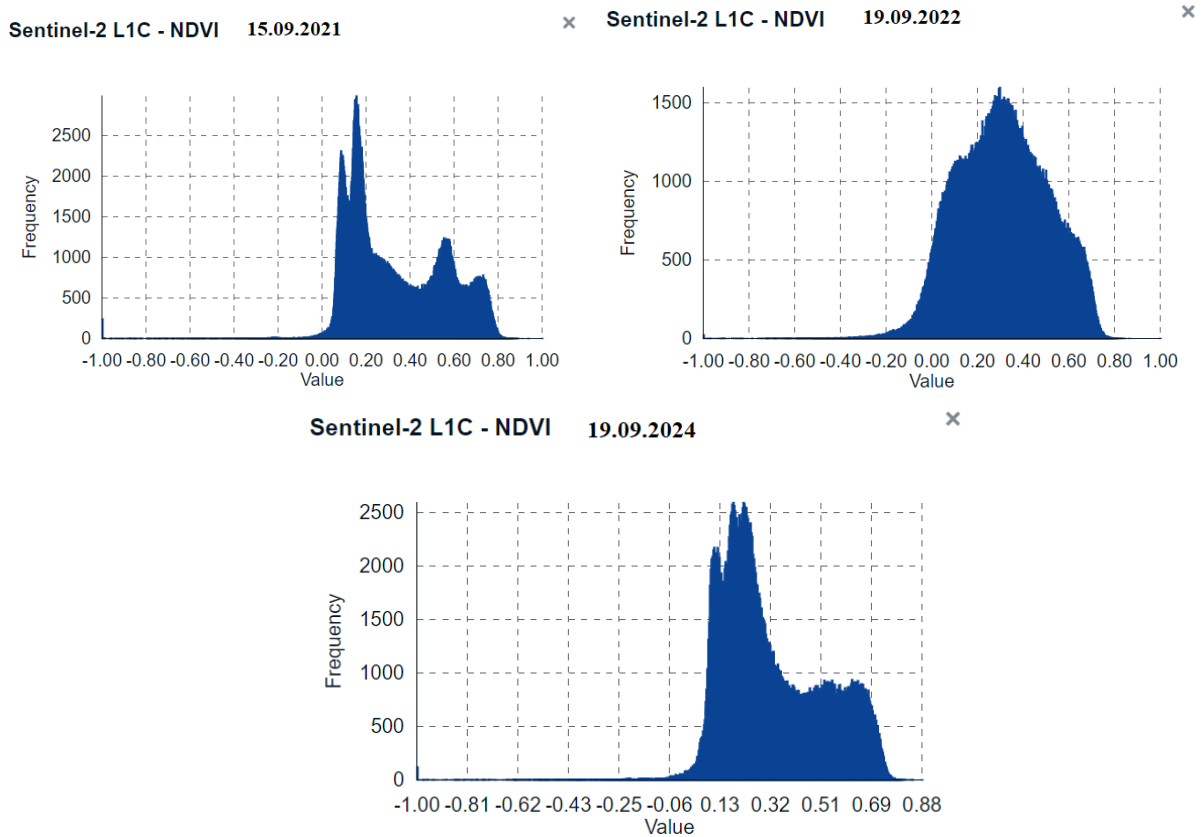


Рис. 5. Дослідження індексу NDVI за супутниковими знімками у районі Ізюму Харківської області / Fig. 5. Investigation of the NDVI index using satellite images in the Izyum district of Kharkiv region

Таким чином, аналіз показує погіршення стану рослинності у 2022 році з частковим відновленням до 2024 року, але до рівня 2021 року вона ще не відновилася. Це вказує на довгострокові екологічні наслідки військових дій.

**Обговорення.** Результати аналізу змін NDVI у Харківській області, зокрема у районах Куп'янська та Ізюма, показують суттєве зниження рівня рослинного покриву під час активних військових дій. Порівняння з іншими дослідженнями, прове-

деними в Україні, демонструє аналогічні тенденції: у Донецькій та Луганській областях, де бойові дії тривали з 2014 року, було зафіксовано значне зниження NDVI, що свідчить про деградацію рослинного покриву внаслідок військових дій, пожеж, вирубування та забруднення. Військові дії призводять до пошкодження рослинного покриву через вибухи, пересування військової техніки та пожежі, спричинені обстрілами. Пожежі, спричинені воєнними діями, завдають значної шкоди при-

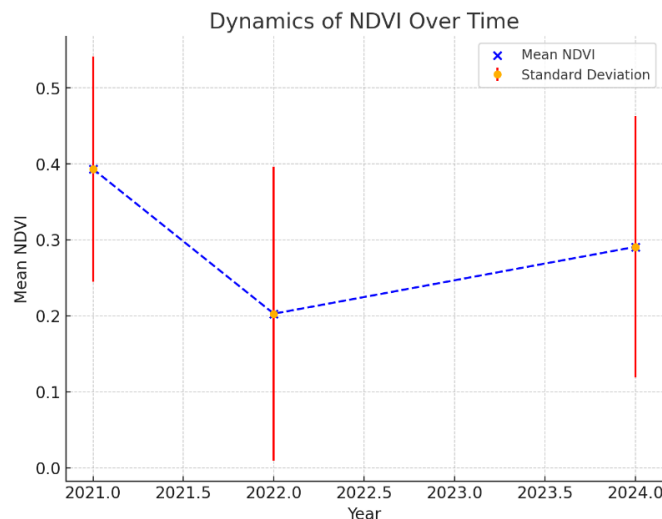


Рис. 6. Динаміка зміни середнього значення NDVI у часі (район Ізюма, Харківська область) / Fig. 6. Dynamics of changes in the average NDVI value over time (Izyum district, Kharkiv region)



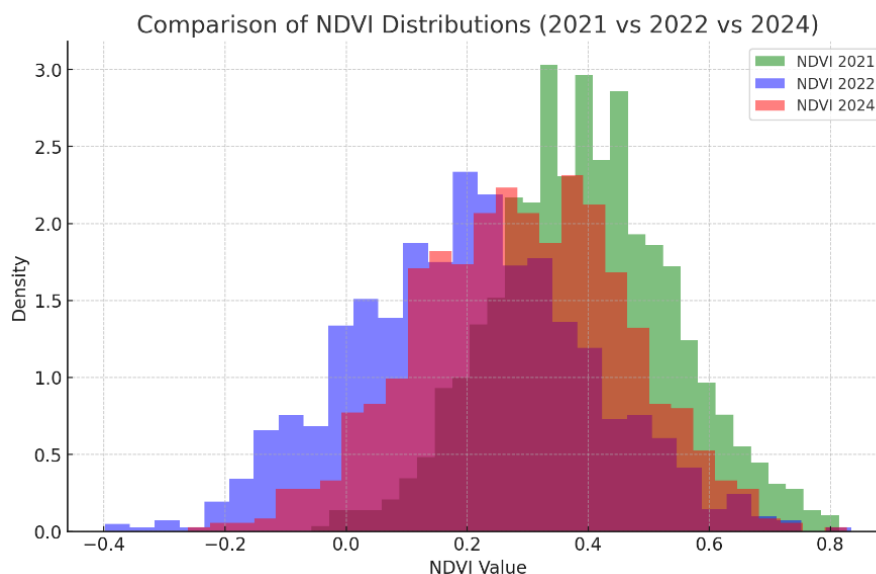


Рис. 7. Порівняння розподілу індексу NDVI для 2021, 2022 та 2024 років у районі м. Ізюм Харківської області/

Fig. 7. Comparison of the distribution of the NDVI index for 2021, 2022 and 2024 in the area of Izyum, Kharkiv region

родним територіям, включно із заповідниками та національними парками. Унаслідок бойових дій спостерігаються суттєві втрати сільськогосподарських угідь, особливо на землях, що не контролюються українським урядом, і в буферній зоні вздовж лінії конфлікту. Сільськогосподарські угіддя в цих регіонах скоротилися на 22% у неконтрольованих зонах і на 46% у буферній зоні [25].

Пошкодження критично важливих об'єктів інфраструктури, таких як фільтрувальні станції, може призвести до значних екологічних наслідків, включно з викидами небезпечних речовин [26].

Дослідження в інших постконфліктних зонах, таких як Ірак, Сирія та Афганістан, також вказують на подібні екологічні наслідки – втрата рослинності, ерозія ґрунтів та забруднення, що призводить до довготривалих змін в екосистемах [27].

Отриманий набір супутникових даних місії Sentinel-2 L2A містить інформацію щодо: дата збору даних,  $NDVI_{min}$ ,  $NDVI_{max}$ ,  $NDVI_{mean}$  – мінімальне, максимальне та середнє значення NDVI, стандартне відхилення значень NDVI,  $NDVI_{median}$  – медіанне значення NDVI.

Медіанний індекс  $NDVI_{median}$  – це центральне значення в наборі вимірювань NDVI, яке ділить всі значення на дві рівні частини: 50% значень знаходяться вище, і 50% – нижче цього значення. Медіана є важливим показником, особливо в ситуаціях, коли набір даних може містити екстремальні або аномальні значення (наприклад, надмірно високі або низькі значення NDVI). Медіана менш чутлива до цих крайніх значень, ніж середнє (mean), і тому часто краще відображає "типове" значення для розподілу даних. У контексті

дослідження екосистем за допомогою NDVI медіана дозволяє отримати більш стійку оцінку стану рослинності в регіоні, оскільки вона не піддається впливу аномалій, таких як поодинокі випадки відсутності рослинності або поганих погодних умов. Такі індекси NDVI використані для графічного представлення результатів аналізу (рис. 8):

- $NDVI_{mean}$  – середній NDVI враховує всі значення в наборі даних і обчислює їх середнє арифметичне. Він може бути зміщений в бік аномально високих або низьких значень.

- $NDVI_{max}$  – максимальний NDVI представляє найвище значення індексу рослинності в даному регіоні або часовому інтервалі, але може бути відображенням лише поодиноких, локалізованих зон густої рослинності.

- $NDVI_{median}$  на відміну від середнього, дає більш надійний показник, який відображає загальний стан рослинності без впливу екстремальних значень, і є важливим для оцінки здоров'я рослинності в умовах, коли екосистеми можуть бути нерівномірно розподілені.

Використання медіани NDVI дозволяє більш точно оцінити стан екосистеми на основі супутникових даних, надаючи стабільнішу картину, особливо в умовах з аномальними факторами, такими як бойові дії. Після початку війни можна помітити зниження NDVI, що може свідчити про початковий вплив бойових дій на екосистему. Це стосується як середніх, так і максимальних значень NDVI. У 2023 році рослинність частково відновилася, однак середні значення NDVI все ще нижчі, ніж до війни, що може свідчити про тривалий вплив бойових дій на певні регіони. У 2024

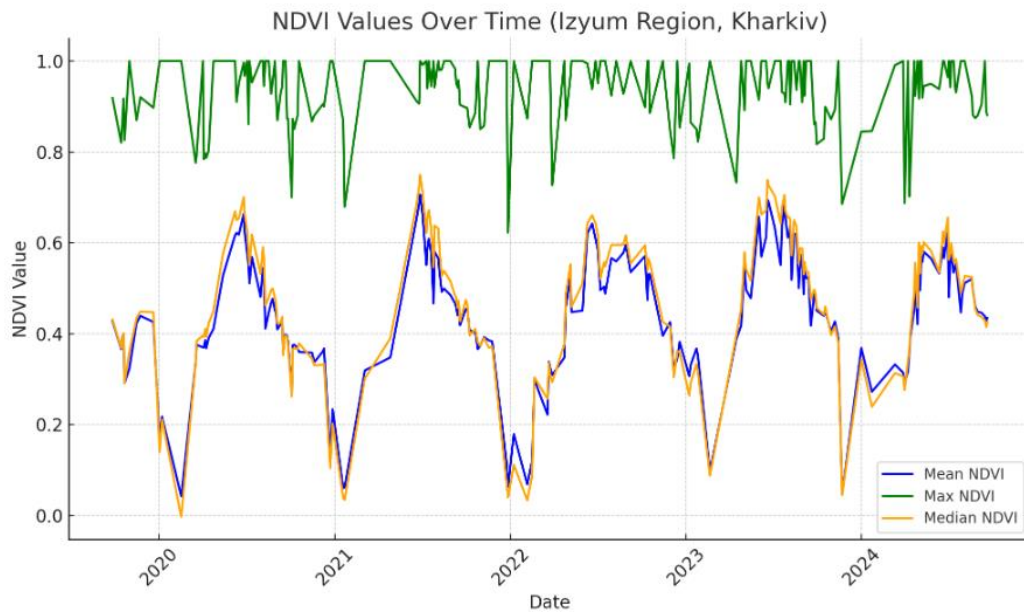


Рис. 8. Динаміка середніх, максимальних і медіанних значень NDVI у районі м. Ізюм Харківської області/

Fig. 8. Dynamics of average, maximum and median NDVI values in the area of Izyum, Kharkiv region

році NDVI залишається нижчим, ніж до війни, особливо в ранні місяці, є ознаки поступового відновлення, хоча максимумами ще не досягли рівня до 2022 року.

Для візуального представлення результатів впливу бойових дій для дослідженого району побудовано теплову карту значень NDVI, яка показує тенденції змін рослинності протягом певного періоду (рис. 9).

Теплова карта була створена шляхом побудови матриці, де по горизонтальній осі розташовані роки, а по вертикальній – місяці. Значення всередині матриці – це середні значення NDVI для кожного місяця та року. Для візуалізації використовувалась колірна шкала: світліші кольори вказують на нижчі значення NDVI, темніші – на вищі. Для побудови карти використовувався алгоритм візуалізації heatmap з бібліотеки Seaborn (модуль Python для наукових візуалізацій). Колірна палітра підкреслює варіації NDVI (від світло-жовтого до темно-зеленого/синього).

Теплова карта наочно відображає середні значення NDVI для кожного місяця з 2020 до 2024 року. Кольори варіюються від більш світлих (менше значення NDVI) до темніших (вищі значення), що допомагає візуалізувати зміни в рослинності протягом різних місяців і років. Як видно з рисунку 9, можна легко ідентифікувати періоди з підвищеною або зниженою рослинністю, що, ймовірно, відповідає сезонним змінам або наслідкам бойових дій у регіоні. На тепловій карті чітко видно циклічні зміни, пов'язані з сезонами. Весняно-літні місяці традиційно мають вищі значення NDVI (темніші кольори), що відповідає

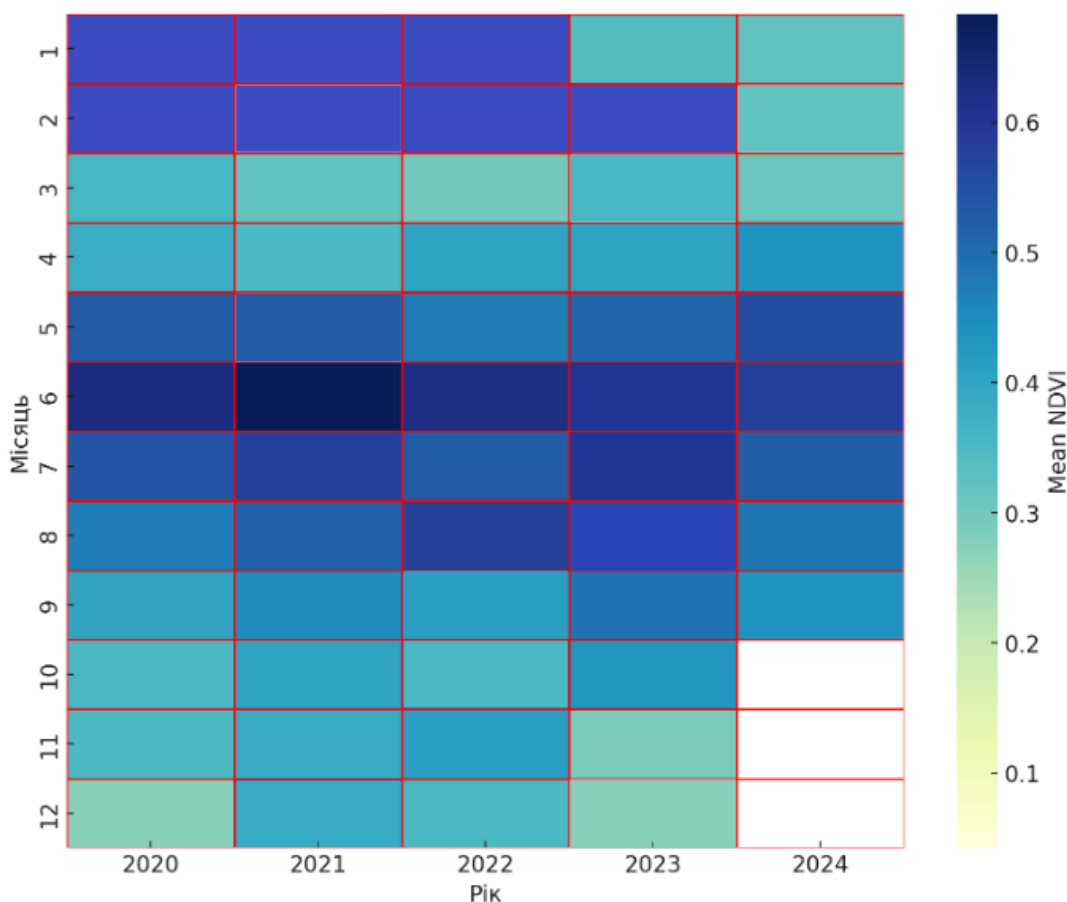
періодам активного росту рослинності. Осінньо-зимові місяці мають нижчі значення NDVI (світліші кольори), що очікувано для холодного сезону з меншою біологічною активністю. До лютого 2022 року, тобто до початку бойових дій, екосистема демонструвала регулярні сезонні коливання. Після початку бойових дій на тепловій карті можна помітити різке зниження значень NDVI навесні та влітку 2022 року. Це вказує на те, що рослинність у регіоні зазнала негативного впливу, ймовірно, через бойові дії, такі як обстріли, пожежі, руйнування інфраструктури та забруднення ґрунтів і води. Це зниження може бути наслідком прямих пошкоджень екосистеми або порушень аграрних і лісових систем.

Таким чином зниження NDVI у весняно-літній період 2024 року може свідчити про серйозний негативний вплив бойових дій на рослинність та загальний екологічний стан регіону. У нормальних умовах ці місяці мали б демонструвати підвищення NDVI через активний ріст рослин, але цього не відбулося, що вказує на погіршення екологічної ситуації. Це також може свідчити про зміну використання земель через бойові дії, що призвело до деградації екосистеми.

#### Обговорення можливих причин змін NDVI.

Зниження NDVI у районі Куп'янська та Ізюма можна пояснити кількома ключовими факторами:

1. Активні бойові дії призводять до руйнування природних ландшафтів, збільшення кількості порушень ґрунту і винищення рослинного покриву. Бомбардування, мінування та рух важкої техніки знищують рослинні угруповання і сприяють ерозії ґрунтів, що унеможливорює швидке від-



NDVI

Рис. 9. Динаміка середніх, максимальних і медіанних значень NDVI у районі м. Ізюм Харківської області (Теплова карта середніх NDVI по місяцях) / Fig. 9. Dynamics of average, maximum and median NDVI values in the area of Izyum, Kharkiv region

новлення рослинності.

2. Військові дії часто супроводжуються масштабними пожежами, які охоплюють значні території. Пожежі в районі Куп'янську та Ізюму, зафіксовані супутниковими знімками, призвели до знищення великих площ лісових масивів та заплавлених лук, що відображається в зниженні показників NDVI. Після таких пожеж екосистеми потребують тривалого періоду для відновлення, оскільки змінюється склад ґрунтів, а насіння і коріння рослин гинуть.

3. Інтенсивне використання вибухівки, пального і хімічних речовин забруднює ґрунти і води. Токсичні речовини можуть знижувати родючість ґрунтів та впливати на здатність рослинного покриву до регенерації. Відповідно, зниження NDVI може бути пов'язане не лише зі знищенням рослинності, але й з погіршенням умов для її відновлення.

Аналіз супутникових даних за період з 2020 до 2024 року показує, що після активних військових дій рослинний покрив у районі Куп'янську та Ізюму починає поступово відновлюватися. Однак темпи цього процесу залишаються повільними,

що можна пояснити значним забрудненням ґрунтів та частими пожежами. Порівняння з іншими постконфліктними регіонами свідчить про те, що природні екосистеми можуть відновлюватися протягом десятиліть, особливо якщо не буде реалізовано заходів щодо очищення територій та рекультивациі.

Прогнозування подальшого розвитку ситуації передбачає, що без активних заходів з екологічної реабілітації цих територій відновлення рослинності буде обмеженим. На основі аналізу NDVI можна зробити висновок, що райони, які зазнали меншого впливу або не були охоплені пожежами, мають вищий потенціал для відновлення, тоді як зони, де відбулися масштабні пожежі та забруднення, потребуватимуть значного втручання для реабілітації.

Таким чином, необхідно розробити стратегію екологічного відновлення для Харківської області, яка враховуватиме як очищення територій від забруднень, так і заходи зі сприяння відновленню рослинного покриву.

**Висновки.** 1. Дослідження виявило значну деградацію екосистем Куп'янського району вна-

лідок військових дій. Аналіз NDVI показав істотне зменшення рослинного покриву протягом 2022–2024 років. Постраждали ліси та сільськогосподарські угіддя, де виявлено зниження біопродуктивності і пошкодження значних площ земель.

2. Війна спричинила масштабне знищення природних територій через військові дії, пожежі та руйнування інфраструктури. Це призвело до довготривалих змін у біорізноманітті та стабільності екосистем. Отримані дані є критично важливими для розробки стратегій відновлення та подальшого моніторингу постраждалих територій, адже дозво-

ляють точно оцінити ступінь пошкоджень.

3. Подальші дослідження повинні зосередитися на деталізації оцінки ступеня деградації ґрунтів, водних ресурсів та лісових масивів. Необхідно розробити комплексну програму екологічного відновлення, що включатиме заходи зі заліснення, відновлення ґрунтів, та очищення водою. Важливо інтегрувати супутникові методи моніторингу у довгострокові програми для контролю за прогресом відновлення екосистем.

*This project was supported by Documenting Ukraine, a project of the Institute for Human Sciences, IWM Vienna.*

#### Список використаної літератури

1. Пацев І. С. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми Житомирщини / Пацев І. С.; Барабаш, О. В.; Пацева, І. Г. // Науково-практичний журнал «Екологічні науки», 2023. - 5(50). - С. 114-118. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.16>
2. Скакун В. Економічні підходи до оцінювання екологічних наслідків війни в Україні / Скакун В., Чинчик А., Страхов А. // Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2023. - 2(50). - С. 266–280. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).266-280](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).266-280)
3. Khrushch O. Environmental and Psychological Effects of Russian War in Ukraine / Khrushch O., Moskalets V., Fedyk O., Karpiuk Y., Hasiuk M., Ivantsev N., Ivantsev L., Arjjumend H. // Grassroots Journal of Natural Resources, 2023. - Vol. 6, No. 1 (April 2023). - P. 37-84. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.060103>
4. Sobol S. The influence of the Russian invasion on the territory of Ukraine on the environmental and general social situation // World-Ger Conference proceedings, 2023. - 1(gec28-01). - P. 58–60. <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2023-28-01-010>
5. Гнедіна К. Загрози екологічній безпеці: реалії воєнного часу та економічне стимулювання повоєного екологічного відновлення України / Гнедіна К., Назорний П. // Проблеми і перспективи економіки та управління, 2023. - (4 (32)). - С. 39–52. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2022-4\(32\)-39-52](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2022-4(32)-39-52)
6. Gardashuk T. Environmental Threats of War in Ukraine // Envigogika, 2022. - 17(1) <https://doi.org/10.14712/18023061.639>
7. Латишева О. В. Дослідження соціальних та екологічних втрат від війни в Україні / Латишева О. В., Ровенська В. В., Смирнова І. І., Міхеев О. Ю. // Економічний вісник Донбасу, 2023. - 2 (68). - С. 199–205. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2\(68\)-199-205](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2(68)-199-205)
8. Brankov T., Armed conflict in Ukraine: food security and environmental implications / Brankov, T., Puškarić, A. // Ekonomika poljoprivrede, 2023. - 70(3). <https://doi.org/10.59267/ekoPolj2303773B>
9. Kapelista I. The Impact of the Russian-Ukrainian War on Global Food and Environmental Security / Kapelista, I., Korniyenko, G., Skliar, V., Voitsitska, K., Derman, V. // WSEAS transactions on environment and development, 2023. - Vol. 19. - P. 808-819. <https://doi.org/10.37394/232015.2023.19.76>
10. Krainiuk O. V. Ecological Consequences of Environmental Pollution with Heavy Metals as a Result of the War in Ukraine / Krainiuk O. V., Buts Y. V., Didenko N. V., Barbashyn V. V. // European Association of Geoscientists & Engineers. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov. 2023, Volume 2023. - P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013>
11. Буц Ю. В. Постпірогенна трансформація біогеохімічних властивостей сірих лісових ґрунтів при техногенному навантаженні / Буц Ю. В., Крайнюк О. В., Лоцман П. І., Сенчихін Ю. М. // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Екологія», 2022. - Вип. 27. - С. 63-71. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-05>
12. Buts Yuriy. Техногенно-екологічні аспекти пірогенного впливу на довкілля / Buts Yuriy, Krainiuk Olena // International security studios: managerial, economic, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Georgian Aviation University. Tbilisi, Georgia 2023. – P. 238-259. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7825520>, <http://www.ndekc.lviv.ua/pdf/267.pdf>
13. Буц Ю. В. Вплив небезпечних токсичних факторів пожеж при військових діях на екосистеми і життєдіяльність населення / Буц Ю. В., Крайнюк О. В., Сенчихін Ю. М., Барабаш О. В., Трішина О. О. // Комунальне господарство міст. Науково-технічний збірник. Серія: Технічні науки та архітектура, 2023. Том 6 випуск 180'2023. - С. 196-202. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-196-201>
14. Maurer P. Protecting the Natural Environment in Armed Conflict. Environmental Policy and Law, 2021. - Vol. 51, No. 1-2. - Pp. 21-24. <https://doi.org/10.3233/EPL-219003>
15. Loets A. Protection of the Environment in Times of Armed Conflict: In Search of a New Legal Perspective // Leiden Journal of International Law, 2020. - 8. - P. 7-40. <https://doi.org/10.1017/S0922156500003083>
16. Соколова Н. А. Международная защита окружающей среды в период вооруженных конфликтов: традиции правового регулирования и новеллы толкования // Lex Russica, 2021. - 74(12). - С. 84-95 <https://doi.org/10.17803/1729-5920.2021.181.12.084-095>

17. Skakun, V. *Economic approaches to assessing the environmental consequences of the war in Ukraine* / Skakun V., Chynchyk A., Strakhov A. // *Ways to Improve Construction Efficiency*, 2023. 2(50), 266–280. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).266-280](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).266-280)
18. Paranjak R. *Problems of environmental protection as an aspect of military confrontation* / Paranjak, R., Gutyj, B., Lytvyn, N., Didorenko, Y. // *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences*, 2023. - 25(98), 200-207. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a9832>
19. Blahopoluchna A. *Environmental and economic damage from the full-scale military invasion of russia in Ukraine* / Blahopoluchna A., Liakhovska N., Parakhnenko V. // *Economies' Horizons*, 2022. [https://doi.org/10.31499/2616-5236.3\(21\).2022.263572](https://doi.org/10.31499/2616-5236.3(21).2022.263572)
20. Padányi J. *The Effects of Armed Conflicts on the Environment* / Padányi J., Földi L. // *Contemporary military challenges. Sodobni vojaški izzivi*, 2023. - 25. - P. 37-52. <https://doi.org/10.2478/cmc-2023-0004>
21. Makarenko N. *The war consequences on natural resources of Ukraine: analyses and methodologies* / Makarenko, N., Strokal, V., Berezniak, Y., Bondar, V., Pavliuk, S., Vagaliuk, L., Naumovska, O., Ladyka, M., Kovpak, A. // *Naukovi Dopovidi Nacional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannâ Ukraïni*, 2022. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2022.04.003>
22. Nahorna N. *The impact of hostilities on the conservation areas of Donetsk region* // *Physical Geography and Geomorphology*, 2023. - 46(1). - P. 47–53. <https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.05>
23. Trofymchuk O. *Detection of surface soil disturbance areas as a result of military actions in Ukraine by remote sensing methods* / Trofymchuk O., Vishnyakov V., Sheviakina N., Klymenko V., Zahorodnia S. // *SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*, 2023. – 23(2.1) <https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s08.20>
24. Налъотов. Д. *Екологічне спустошення від війни: проблеми, які будуть вирішуватись поколіннями*, 2024 <https://www.pravda.com.ua/columns/2024/09/26/7476908/>
25. Skakun S. *Satellite Data Reveal Cropland Losses in South-Eastern Ukraine Under Military Conflict* / Skakun S., Justice C., Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M. // *Frontiers in Earth Science*, 2019. - 7. - P. 305. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00305>
26. Ulytsky O. *Risk of man-made and ecological disasters at the filter stations in the Donetsk and Luhansk regions* / Ulytsky, O., Yermakov, V., Buglak, O., Lunova, O. // *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2018. - 27(1), 138-147. <https://doi.org/10.15421/111839>
27. Bildirici M. *The impact of terrorism and FDI on environmental pollution: Evidence from Afghanistan, Iraq, Nigeria, Pakistan, Philippines, Syria, Somalia, Thailand and Yemen* / Bildirici, M., & Gokmenoglu, S. // *Environmental Impact Assessment Review*, 2020. - 81. - 106340. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106340>

**Внесок авторів:** всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

**Конфлікт інтересів:** автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

## Ecosystem degradation in Kharkiv region during the war: satellite analysis

**Olena Krainiuk**<sup>1</sup>

PhD (Technology), Associate Professor of the Department of Metrology and Life Safety,  
<sup>1</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;

**Yuriy Buts**<sup>2</sup>

DSc (Technical), Professor of the Department of Metrology and Life Safety,  
<sup>2</sup> Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;

**Vitalii Barbashyn**<sup>3</sup>

PhD (Technology), Associate Professor of the Department of Occupational Health and Safety,  
<sup>3</sup> O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, Kharkiv, Ukraine;

**Olga Nikitchenko**<sup>3</sup>

PhD (Technology), Associate Professor of the Department of Occupational Health and Safety;  
**Valerii Sukhov**<sup>4</sup>

PhD, Head of the Department of Fundamental and Applied Geology,  
<sup>4</sup> V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

### ABSTRACT

**Problems Statement and Purpose.** The article investigates the degradation of ecosystems in the Kharkiv region due to military actions, specifically in Kupiansk and Izyum districts. The destruction of plant cover and natural landscapes, exacerbated by fires and other war-related damages, poses long-term ecological challenges. The purpose of the study is to assess these impacts through satellite monitoring using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to identify the most affected areas and plan for their ecological restoration.

**Materials and Methods of Research.** The research utilizes satellite images from the Copernicus Sentinel-2 platform to analyze changes in NDVI values between 2021 and 2024. This methodology allows for the detection of vegetation degradation in the studied areas and employs Geographic Information Systems (GIS) to map and visualize the extent of environmental damage. NDVI indices are analyzed for variations over time, providing insights into the effects of military actions on the region's vegetation.

**Results.** The results of the study indicate a dramatic reduction in NDVI values in the Kupiansk and Izyum districts, particularly in 2022, which coincided with the height of military activities in the region. NDVI values in 2022 showed a 48% decrease compared to 2021, reflecting the extensive loss of vegetation due to forest fires, bombings, and the movement of heavy military equipment, which caused both direct destruction and secondary effects such as soil compaction and erosion. In 2024, some recovery in NDVI values was observed, but these remained significantly lower than pre-war levels, indicating that full ecological recovery has not yet been achieved. The study further identified key ecological hotspots where vegetation loss was most severe, particularly in areas close to conflict zones, such as military bases and frontlines. The analysis showed that forested areas suffered the greatest damage, with significant portions of these ecosystems either destroyed or severely degraded. The GIS-based analysis also revealed a correlation between the intensity of military actions and the degree of vegetation loss, with the most severely affected areas being those that experienced sustained bombardment and heavy combat. The data suggest that the recovery of these areas will require substantial effort, including reforestation, soil remediation, and the implementation of erosion control measures to prevent further degradation.

**Conclusions.** 1). The war has led to significant environmental damage in the Kharkiv region, with substantial loss of vegetation cover and ecosystem services. 2). The NDVI analysis highlights the most affected areas, showing both the immediate and lingering effects of war on plant cover. 3). Continued monitoring and a comprehensive ecological restoration strategy are necessary to restore the region's natural landscapes, with reforestation and soil recovery being critical components. This study provides a crucial foundation for further research on the ecological impacts of warfare and offers practical recommendations for the restoration of war-torn ecosystems in Ukraine. The findings can be applied to other conflict-affected regions, emphasizing the need for a proactive approach to environmental recovery in post-war scenarios.

**Keywords:** *Kharkiv region, military impact, ecosystem degradation, NDVI, satellite monitoring, vegetation cover, ecological restoration, forest fires, GIS, post-war recovery.*

#### References

1. Patsev, I.S.; Barabash, O.V.; Patseva, I.G. (2023) *Impact of military actions on forest ecosystems of Zhytomyr region. Scientific and Practical Journal 'Ecological Sciences'*, 5(50). 114-118. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.16> [in Ukrainian]
2. Skakun V. Chynchyk, A., Strakhov, A. (2023) *Economic approaches to assessing the environmental consequences of the war in Ukraine. Improve Construction Efficiency*, 2(50). 266–280. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).266-280](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).266-280) [in Ukrainian]
3. Khrushch, O., Moskalets, V., Fedyk, O., Karpiuk, Y., Hasiuk, M., Ivantsev, N., Ivantsev, L., & Arjjumend, H. (2023). *Environmental and Psychological Effects of Russian War in Ukraine. Grassroots Journal of Natural Resources*. 6, 1 (April 2023), 37-84. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.060103>
4. Sobol, S. (2023). *The influence of the russian invasion on the territory of ukraine on the environmental and general social situation. World-Ger Conference proceedings*, 1(gec28-01). 58–60 <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2023-28-01-010>
5. Hnedina, K., Nahorni, P. (2022). *Threatsto ecological safety: realities of wartime and economic stimulation of post-war ecological restoration of Ukraine. Problems and prospects of economics and management*, (4 (32). 39–52. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2022-4\(32\)-39-52](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2022-4(32)-39-52) [in Ukrainian]
6. Gardashuk, T. (2022). *Environmental Threats of War in Ukraine. Envigogika*, 17(1). <https://doi.org/10.14712/18023061.639>
7. Latysheva, O., Rovenska, V., Smirnova, I., Mikheev, O. (2022). *Research of Social and Ecological Losses from the War in Ukraine. Economic Herald of the Donbas*, 2 (68). 199–205 [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2\(68\)-199-205](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2(68)-199-205) [in Ukrainian]
8. Brankov, T., Puškarić, A. (2023). *Armed conflict in ukraine: food security and environmental implications. Ekonomika poljoprivrede*, 70(3). <https://doi.org/10.59267/ekopolj2303773b>
9. Kapelista, I., Korniyenko, G., Skliar, V., Voitsitska, K., & Derman, V. (2023). *The Impact of the Russian-Ukrainian War on Global Food and Environmental Security. WSEAS transactions on environment and development*, 19. P. 808-819 <https://doi.org/10.37394/232015.2023.19.76>
10. Krainiuk O. V., Buts Y. V., Didenko N. V., Barbashyn V. V. (2023). *Ecological Consequences of Environmental Pollution with Heavy Metals as a Result of the War in Ukraine. // European Association of Geoscientists & Engineers. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Nov. 2023, 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013>
11. Buts Y.V., Krainiuk O.V., Lotsman P.I., Senchikhin Y.M. (2022). *Post-pyrogenic transformation of biogeochemical properties of grey forest soils under anthropogenic load Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University and V.N.*

- Karazin Moscow State University, Series «Ecology», 27. 63-71. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-05> [in Ukrainian]
12. Buts Yuriy, Krainiuk Olena (2023). *Technogenic and ecological aspects of pyrogenic impact on the environment. International security studios: managerial, economic, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Georgian Aviation University. Tbilisi, Georgia. 238-259.* <https://doi.org/10.5281/zenodo.7825520>, ISSN 1512-4916, <http://www.ndekc.lviv.ua/pdf/267.pdf>
  13. Buts Y.V., Krainiuk O.V., Senchikhin Y.M., Barbashyn V.V., Trishina O.O. (2023) *The impact of dangerous toxic factors of fires during military operations on ecosystems and human activity. Municipal Economy of Cities. Scientific and technical collection. Series: Technical sciences and architecture, 6, 180. 196-202.* <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-196-201> [in Ukrainian]
  14. Maurer, P. (2021). *Protecting the Natural Environment in Armed Conflict. Environmental Policy and Law. 51, 1-2, 21-24.* <https://doi.org/10.3233/EPL-219003>
  15. Loets A. (2020). *Protection of the Environment in Times of Armed Conflict: In Search of a New Legal Perspective. Leiden Journal of International Law, 8, 7-40.* <https://doi.org/10.1017/S0922156500003083>.
  16. Sokolova, N. (2021). *International Environmental Protection in Armed Conflicts: Traditional Legal Regulation and Interpretation Novelties. Lex Russica, 74(12). 84-95* <https://doi.org/10.17803/1729-5920.2021.181.12.084-095>. [in Ukrainian]
  17. Skakun, V., Chynchyk, A., & Strakhov, A. (2023). *Economic approaches to assessing the environmental consequences of the war in Ukraine. Ways to Improve Construction Efficiency, 2(50), 266–280.* [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).266-280](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).266-280).
  18. Paranjak, R., Gutyj, B., Lytvyn, N., Didorenko, Y. (2023). *Problems of environmental protection as an aspect of military confrontation. Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences, 25(98), 200-207.* <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a9832>.
  19. Blahopoluchna, A., Liakhovska, N., & Parakhnenko, V. (2022). *Environmental and economic damage from the full-scale military invasion of russia in Ukraine. Economies' Horizons.* [https://doi.org/10.31499/2616-5236.3\(21\).2022.263572](https://doi.org/10.31499/2616-5236.3(21).2022.263572)
  20. Padányi, J., & Földi, L. (2023). *The Effects of Armed Conflicts on the Environment. Contemporary military challenges/sodobni vojaški izzivi, 25, 37-52.* <https://doi.org/10.2478/cmc-2023-0004>
  21. Makarenko, N., Stokal, V., Berezhniak, Y., Bondar, V., Pavliuk, S., Vagaliuk, L., Naumovska, O., Ladyka, M., & Kovpak, A. (2022). *The war consequences on natural resources of Ukraine: analyses and methodologies. Naukovi Dopovidi Nacional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannâ Ukraini.* <https://doi.org/10.31548/dopovidi2022.04.003>
  22. Nahorna, N. (2023). *The impact of hostilities on the conservation areas of Donetsk region. Physical Geography and Geomorphology.* <https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.05>
  23. Trofymchuk, O., Vishnyakov, V., Sheviakina, N., Klymenko, V., Zahorodnia, S. (2023). *Detection of surface soil disturbance areas as a result of military actions in Ukraine by remote sensing methods. sgem International Multidisciplinary Scientific GeoConference. EXPO Proceedings, 23(2.1).* <https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s08.20>
  24. Nalitov, D. *Environmental devastation from war: problems that will be solved for generations, 2024* <https://www.pravda.com.ua/columns/2024/09/26/7476908/> [in Ukrainian]
  25. Skakun, S., Justice, C., Kussul, N., Shelestov, A., Lavreniuk, M. (2019). *Satellite Data Reveal Cropland Losses in South-Eastern Ukraine Under Military Conflict. Frontiers in Earth Science, 7, 305.* <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00305>.
  26. Ulytsky, O., Yermakov, V., Buglak, O., Lunova, O. (2018). *Risk of man-made and ecological disasters at the filter stations in the Donetsk and Luhansk regions. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 27(1), 138-147.* <https://doi.org/10.15421/111839>.
  27. Bildirici, M., & Gokmenoglu, S. (2020). *The impact of terrorism and FDI on environmental pollution: Evidence from Afghanistan, Iraq, Nigeria, Pakistan, Philippines, Syria, Somalia, Thailand and Yemen. Environmental Impact Assessment Review, 81, 106340.* <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106340>.

**Authors Contribution:** All authors have contributed equally to this work

**Conflict of Interest:** The authors declare no conflict of interest

Received 4 October 2024

Accepted 9 November 2024