

© І.В. Міронов<sup>1</sup>, В.Є. Колесник<sup>1</sup>, Ю.В. Бучавий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## АНАЛІЗ ШКОДИ ВІД БОЙОВИХ ДІЙ ДЛЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ДИСТАНЦІЙНИХ МЕТОДІВ ТА ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ

© I. Mironov<sup>1</sup>, V. Kolesnik<sup>1</sup>, Y. Buchavyy<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

### ANALYSIS OF DAMAGE FROM MILITARY ACTIONS TO LAND RESOURCES USING REMOTE SENSING AND GIS-TECHNOLOGIES

**Мета.** Підвищення точності оцінки рівнів і масштабів забруднення, пошкодження та скорочення сільськогосподарських земель як ресурсної складової довкілля після тривалих бойових дій на основі геоінформаційних технологій.

**Методика дослідження.** Дослідження базувалося на аналізі супутникових знімків і геоінформаційному моделюванні для оцінки впливу бойових дій на земельні ресурси Запорізької області, як складової її екологічної безпеки. Для виявлення пошкоджених земель, змін у землекористуванні та деградації рослинності застосовувалися методи дистанційного зондування. Аналіз вегетаційних індексів дозволив оцінити стан угідь у динаміці, а радіолокаційні дані – дослідити деформації рельєфу, спричинені обстрілами.

**Результати дослідження.** Обґрунтовано вибір засобів дистанційного зондування для аналізу територій, пошкоджених бойовими діями, з подальшим опрацюванням у ГІС. Оцінено екологічні наслідки бойових дій для земельного фонду України на прикладі Запорізької області. Зафіксовано зміни рельєфу, скорочення активного землеробства через мінування, руйнування інфраструктури та деградацію ґрунтів. Виявлено забруднення ґрунтів хімічними речовинами, паливом і мастильними матеріалами.

**Наукова новизна.** Полягає у використанні SAS.Planet у поєднанні з ГІС QGIS для високоточного картографічного моделювання пошкоджених земель. Встановлено закономірності змін рослинного покриву залежно від інтенсивності бойових дій, виконано класифікацію земельних ділянок за рівнем їх екологічної і ресурсної деградації в період бойових дій у 2022–2024 роках. Подальшого розвитку набули методи побудови моделей висот і автоматизованого аналізу пошкоджених територій, в тому числі вирвами від снарядів, на основі їх дистанційного зондування з використанням радарних даних високої роздільної здатності.

**Практичне значення.** Результати підтвердили здатність геоінформаційних технологій забезпечити достатньо точне визначення: масштабів пошкоджень; змін у землекористуванні, забрудненні ґрунтів, стані рослинності та рельєфі; площ трансформації земель, що загалом відбуваються під впливом бойових дій та необхідні для перспективного відновлення земельного ресурсу регіону.

**Ключові слова:** геоінформаційні технології, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), екологічні наслідки війни, землекористування, вегетаційний індекс (NDVI), відновлення земель.

**Вступ.** В умовах бойових дій актуальним стає аналіз їхнього впливу на екологічну безпеку довкілля, яка тісно пов'язана з рівнем використання та збереженням земельних ресурсів. Стан земельного фонду, який визначає обсяги земельних ресурсів, є дуже важливим для України, оскільки живить економіку та

забезпечує життєво необхідні потреби населення. Зростаючі екологічні загрози, такі як забруднення довкілля хімічними речовинами та руйнування природних екосистем та ландшафтів створюють серйозні виклики. Наразі через бойові дії точно оцінити рівень і масштаби забруднення, пошкодження та скорочення сільськогосподарських земель в Україні, досить складно. Тобто є проблема підвищення точності указаної шкоди і оцінок, яка потребує вирішення. Отже, важливо вже зараз збирати та аналізувати дані про стан уражених територій, щоб точно визначити масштаби проблеми та ефективно спланувати подальші дії.

Ефективним інструментом оцінки екологічної шкоди від надзвичайних подій, зокрема військового конфлікту, є геоінформаційні технології. Вони дають змогу визначати масштаби збитків, оцінювати стан ґрунтів, відстежувати зміни та виявляти землі, що потребують відновлення [1]. Завдяки багат шаровим цифровим картам ГІС фіксують динаміку змін ландшафтів, сприяючи системному аналізу наслідків бойових дій. Отримані дані допомагають не лише оцінити шкоду, а й розробити стратегії її мінімізації та відновлення довкілля.

Зауважимо, що для визначення розмірів шкоди земельним ресурсам та відповідних збитків на період бойових дій Міністерство надзвичайних ситуацій України запропонувало у відповідній методиці множити розраховані збитки на коефіцієнт 3 [2]. Це забезпечило оперативність оцінювання шкоди і фінансових збитків, але очевидно не є точним для оцінювання екологічного стану уражених територій та втрат земельних ресурсів.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє отримувати уточнені дані про зміни земної поверхні, атмосфери та водних ресурсів, аналізуючи природне чи штучне випромінювання, яке реєструють супутникові й авіаційні сенсори.

Завдяки регулярному оновленню даних можна відстежувати екологічні процеси в динаміці, отримуючи точну й об'єктивну інформацію. Такі дані стають дедалі доступнішими, що робить цю технологію важливим інструментом для наукових досліджень і екологічного моніторингу.

Аналіз даних, отриманих від космічних апаратів показав, що [3]:

- при класифікації земель успішно використовуються космічні методи дослідження природних ресурсів;
- близько 90% необхідних даних для повного аналізу використання сільськогосподарських земель можливо отримати за допомогою дистанційного зондування;
- лише приблизно 2...5% інформації про характер землеволодіння та призначення сільськогосподарських культур неможливо отримати методами дистанційного зондування.

Геоінформаційні системи (ГІС) та ДЗЗ забезпечують отримання, інтеграцію, аналіз і візуалізацію різноманітних географічних даних на цифрових картах. ГІС поєднує картографічні можливості з базами даних та аналітичними інструментами, що робить її ефективним інструментом для роботи з просторовими даними.

Широке використання зазначених геоінформаційних технологій для прийняття рішень у сфері управління та охорони природних ресурсів передбачене Законом України «Про національну програму інформатизації» [4] і Постановою

Кабінету Міністрів України «Про заходи по створенню електронної інформаційної системи «Електронний уряд» [5].

Незважаючи на досвід використання ГІС та ДЗЗ у цивільній практиці, велику кількість наукових праць та значні досягнення у застосуванні цих інструментів для контролю ресурсів, не вирішеним залишається проблемне завдання підвищення точності оцінки рівнів і масштабів забруднення, пошкодження та скорочення сільськогосподарських земель як ресурсної складової довкілля після тривалих бойових дій на основі застосуванням геоінформаційних технологій, що стало **метою** дослідження. Для досягнення поставленої мети ставилися наступні **завдання**:

- проаналізувати особливості ДЗЗ та обґрунтувати вибір методів і засобів їх реалізації на основі прикладів обстеження територій з наступною їх адаптацією для обстеження земель, пошкоджених бойовими діями;
- оцінити екологічні наслідки військових дій для земельного фонду України, зокрема на прикладі Запорізької області, із застосуванням геоінформаційних систем (ГІС) за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ);
- визначити масштаби пошкоджень, зміни у землекористуванні, рівень забруднення ґрунтів та перспективи відновлення аграрного потенціалу регіону на основі передових засобів і аналітичних програм геоінформаційного моделювання характеристик ґрунтів, рослинності сільськогосподарських угідь, їх рельєфу та площ трансформації, зокрема під впливом бойових дій.

Дослідження виконувалися на основі інформації, отриманої з інтернет-ресурсів [1, 2] з урахуванням законодавчих та нормативних документів [4–6], а також авторських публікацій [3, 7] та літературного джерела [6].

**Основна частина.** Для досягнення поставленої мети виконаємо пошук, аналіз та вибір методів і засобів ДЗЗ, здатних забезпечити оцінку впливу військових дій на сільськогосподарські землі.

Розглянемо деякі відомі приклади реалізації спостережень та аналізу із застосуванням ДЗЗ.

1. *Оцінка пошкоджень сільськогосподарських угідь.* ДЗЗ використовується для ідентифікації та картографування пошкоджених ділянок сільськогосподарських угідь, таких як кратери від вибухів, вигорілі ділянки та забруднені території. Така інформація корисна для оцінки масштабів збитків, планування відновлення та надання гуманітарної допомоги.

2. *Моніторинг зміни землекористування.* ДЗЗ відстежує зміни у землекористуванні, спричинених військовими діями, таких як перетворення орних земель на зони бойових дій. Підходи моніторингу зміни землекористування допомагають зрозуміти довгостроковий вплив війни на сільське господарство та продовольчу безпеку.

3. *Виявлення забруднення.* ДЗЗ застосовується для виявлення та картографування забруднення ґрунту, води та повітря, спричиненого військовими діями, наприклад, витоками палива, хімічними викидами та розривами боєприпасів. Отримана інформація дозволяє оцінити ризики для здоров'я людей та навколишнього середовища та планувати заходи з очищення.

4. *Оцінка впливу на екосистеми.* ДЗЗ використовується для оцінки впливу військових дій на екосистеми, такі як ліси, водно-болотні угіддя та природні заповідники, що сприяє захисту довкілля.

В умовах бойових дій ДЗЗ забезпечує отримання інформації про об'єкти на земній поверхні без прямого контакту, гарантуючи безпеку збору даних. Сенсори на супутниках, літаках і дронах фіксують електромагнітне випромінювання, що дозволяє аналізувати властивості об'єктів, здійснювати візуальний аналіз, класифікувати земельний покрив і відстежувати зміни.

Космічні апарати ДЗЗ автономно виконують високоточні знімки для картографування, вимірювання рельєфу та визначення вологості ґрунту. Дані передаються на наземні станції або ГІС, де проходять корекцію та геоприв'язку. Завдяки високій роздільній здатності знімків можна детально аналізувати наслідки бойових дій, визначати площу пошкоджених територій і виявляти забруднення.

Нефотографічні методи дистанційного зондування базуються на засобах або датчиках виявлення забруднення земної поверхні. Проаналізуємо деякі поширені типи нефотографічних методів дистанційного зондування.

1. *Спектральні дані.* Засоби ДЗЗ вимірюють спектр електромагнітного випромінювання, що відбивається від об'єкта. Отримані дані використовують для визначення типу покриву землі, стану рослинності, вологості ґрунту та інших властивостей.

2. *Радарне зондування.* Метод використовує ультракороткі радіохвилі для картографування та працює за будь-яких погодних умов, оскільки радарне випромінювання проникає крізь хмари й опади.

3. *Лідарні дані.* Лідари вимірюють відстань лазерними імпульсами, що дозволяє створювати 3D-моделі рельєфу, оцінювати висоту рослинності та визначати розміри вирв від вибухів.

Таким чином, ДЗЗ відіграє важливу роль у наданні інформації, необхідної для прийняття обґрунтованих рішень щодо пом'якшення наслідків бойових дій для навколишнього середовища та сприяння сталому відновленню.

У подальшому дослідженні нами проаналізовано вплив війни на земельний фонд України на прикладі земельних ресурсів сільськогосподарського призначення Запорізької області. Зокрема визначено масштаби пошкоджень, зміну структури землекористування та оцінено перспективи відновлення аграрного потенціалу регіону. Ситуація в сільськогосподарському секторі Запорізької області зараз ускладнена через війну, що триває. Багато земель не обробляються через бойові дії, мінування, окупацію або забруднення. Інфраструктура пошкоджена, мережі постачання порушені.

Окрім цього, часткова окупація ускладнює доступ до земельних ресурсів і перешкоджає веденню господарської діяльності. Руйнування інфраструктури, зокрема сховищ, елеваторів та сільгосптехніки, ще більше поглиблює кризу, роблячи відновлення аграрного сектору складним завданням.

Робота з визначення оцінки збитків для довкілля від бойових дій проводилася за алгоритмом, поданим на рисунку 1.

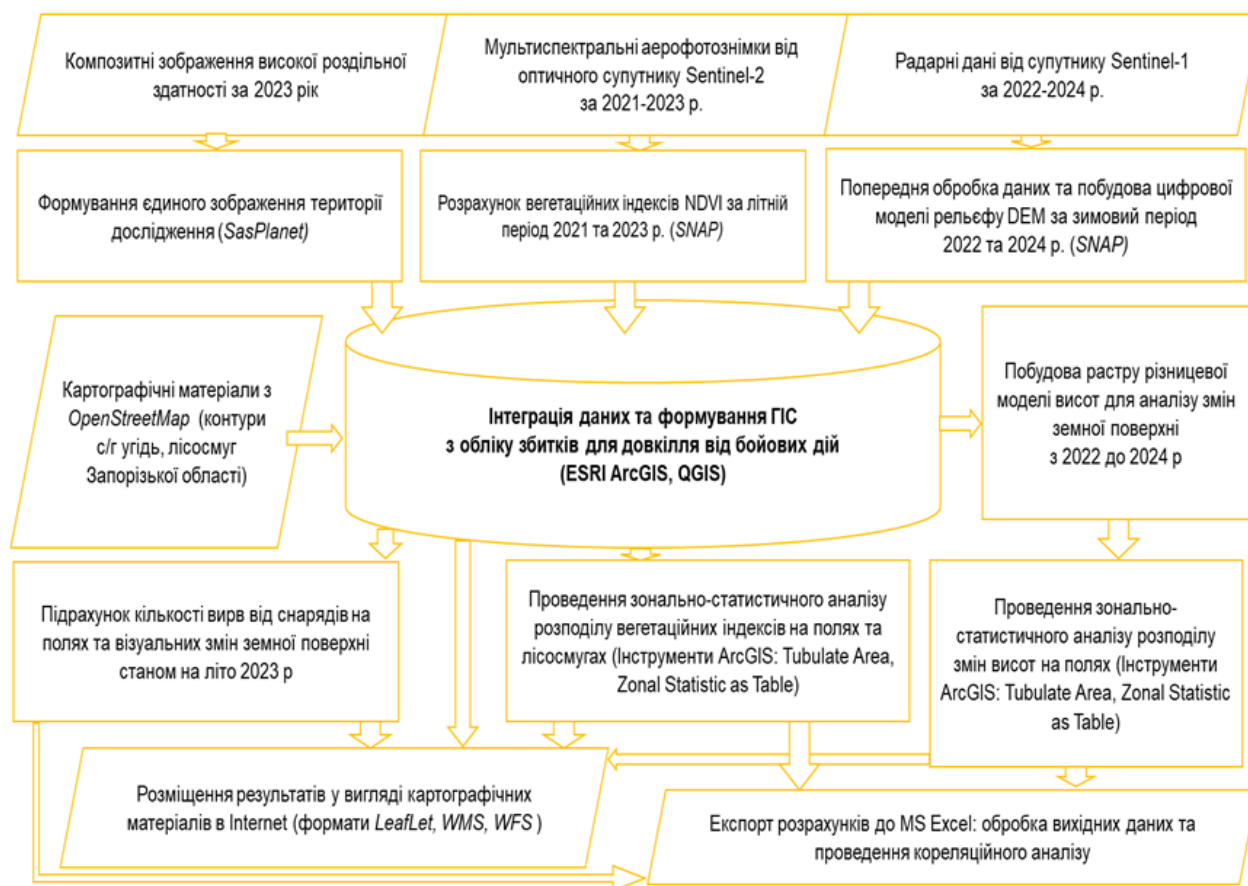


Рис. 1. Алгоритм аналізу екологічних наслідків бойових дій на основі дистанційних даних

У дослідженні наслідків війни в Запорізькій області використовували *SAS.Planet* – програму для доступу до супутникових знімків і картографічних даних високої деталізації. Вона дозволяє аналізувати зміни ландшафту, визначати пошкоджені території та працювати з популярними картографічними сервісами (*Google Earth, Bing Maps, DigitalGlobe, Yahoo! Maps* тощо).

На відміну від онлайн-сервісів, *SAS.Planet* зберігає карти на комп'ютері для офлайн-доступу, підтримує вимірювання відстаней, GPS-навігацію та збереження вибраних ділянок для подальшого аналізу. Функція «Формування карти заповнення шару» дає змогу кешувати потрібні області, а пошук через інтернет-сервіси допомагає знаходити конкретні об'єкти.

За допомогою *SAS.Planet* проведено геоінформаційний аналіз сільськогосподарських угідь Запорізької області, що постраждали від бойових дій, та виявлено пошкоджені ділянки для подальшого дослідження.

На знімках прифронтових територій Запорізької області, отриманих через *SAS.Planet*, чітко видно наслідки бойових дій. Військові операції спричинили знищення рослинного покриву та посівів, що проявилися у зміні кольору ґрунту. На знімках також помітні пошкоджені дороги, будівлі та інші об'єкти інфраструктури. Пожежі, спричинені бойовими діями, залишили на ґрунті характерні сліди. Забруднення ґрунту хімічними речовинами, паливом і мастильними матеріалами ідентифікуються на зображеннях у вигляді плям різних кольорів (рис. 2).

Отримані знімки демонструють значний масштаб руйнувань, спричинених активними воєнними операціями.

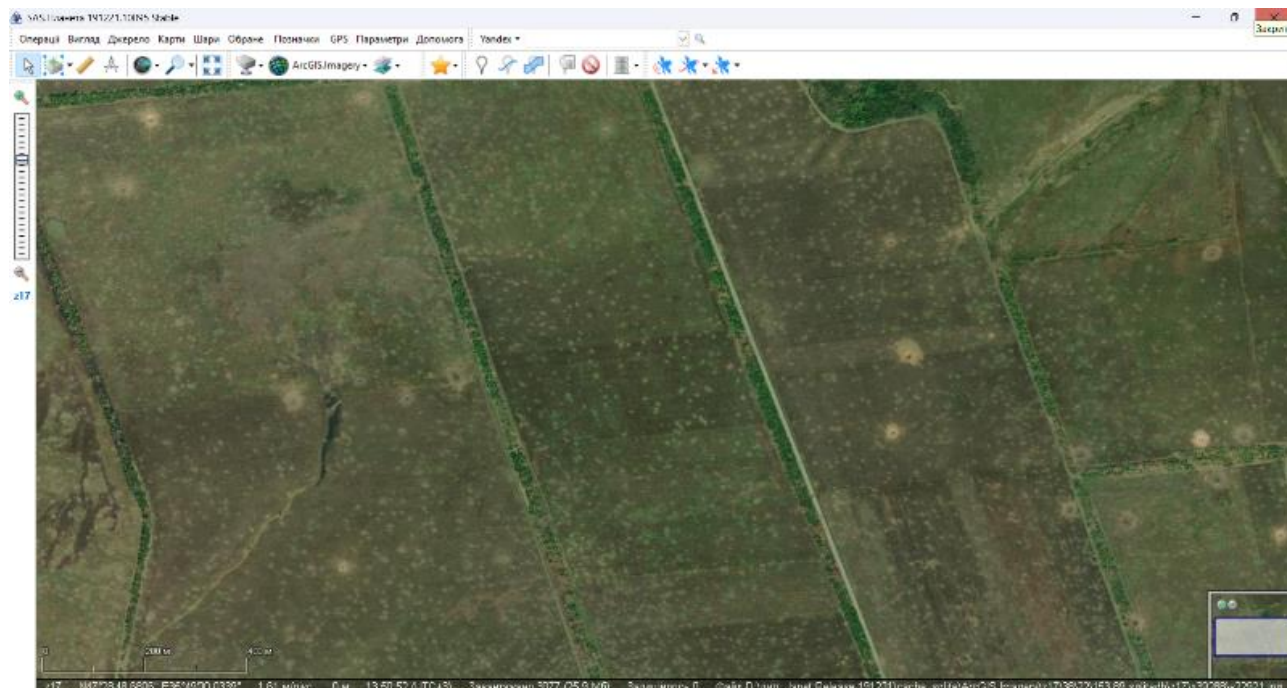


Рис. 2. Оброблене зображення території з вирвами від снарядів у *SAS.Planet* (Запорізька область)

Для аналізу геопросторових даних використано *QGIS* – багатоплатформну геоінформаційну систему, що дозволяє працювати з картографічними матеріалами, оцінювати зміни довкілля та проводити просторові розрахунки. Програма підтримує інтеграцію з іншими ГІС, використання відкритих даних, створення інтерактивних карт і географічну прив’язку зображень.

За допомогою *QGIS* створено детальну цифрову карту Запорізької області з оновленими атрибутами та уточненими об’єктами. Геодані експортувалися з *SAS.Planet*, після чого в *QGIS* створено растровий шар для детального аналізу території та впливу бойових дій на сільське господарство й природні ландшафти.

Під час дослідження в *QGIS* були проаналізовані супутникові знімки та визначено кількість пошкоджень, спричинених військовими діями. Зокрема, були пораховані вирви від снарядів, ділянки, охоплені пожежами, та інші ознаки руйнувань. Усі зібрані дані внесені до відповідних атрибутів у шарах карти, що дозволило створити більш детальну та структуровану базу пошкоджених територій. Завдяки можливостям *QGIS* карта була доповнена додатковими шарами, що відображають рівень пошкоджень, заміновані території, рівень забруднення ґрунтів та інші критично важливі дані для подальшого моніторингу та прийняття рішень.

Дистанційний моніторинг фітоценозів включає отримання даних про екологічний стан без фізичної присутності дослідників на місці. За допомогою супутникових знімків, аерофотографування та даних із дронів можна оперативно виявляти зміни у структурі рослинного покриву, стані ґрунтів та водних ресурсів,

що важливо для територій, порушених військовими діями. Дистанційний моніторинг дозволяє визначати рівень деградації фітоценозів і здійснювати спостереження за динамікою відновлення рослинного покриву.

Вегетаційні індекси для літніх періодів 2021 і 2023 років були проаналізовані за допомогою цифрових карт, створених на основі багатоспектральних знімків із супутника *Sentinel-2*. Аналіз рослинного покриву за показниками нормалізованого вегетаційного індексу (*NDVI*) для літа 2021 року представлений на рисунку 3.

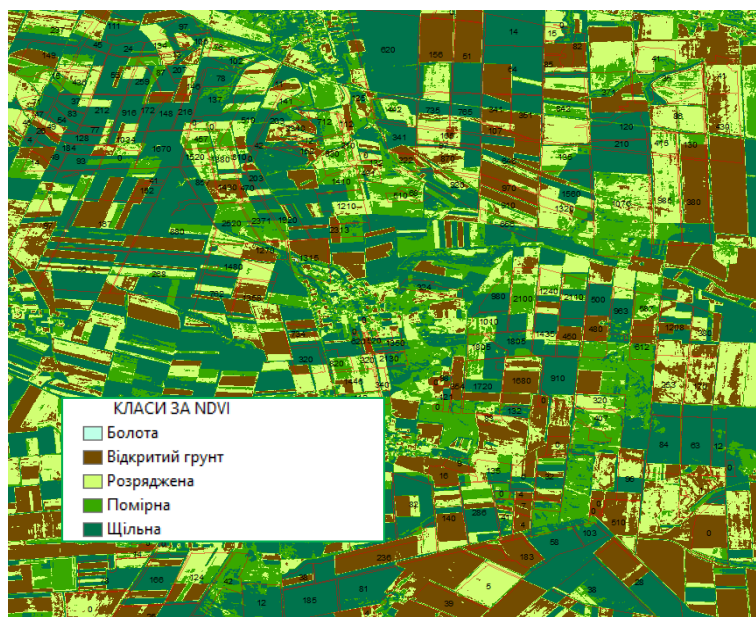


Рис. 3. Дослідження характеристик рослинності влітку 2021 року

Аналіз зображення за 2021 рік дозволяє чітко розрізнити різні типи сільськогосподарських угідь. Ділянки з густою рослинністю демонструють високий рівень фотосинтетично активної фітомаси, що свідчить про активне землеробство. Водночас території, де вже завершено жнива, відзначаються відкритими ґрунтами згідно з класифікацією *NDVI*. Окремо можна виділити землі, що перебували у стані «пару» – вони або тимчасово не використовувалися, або проходили природне відновлення після збору врожаю. Такі території за своєю структурою нагадують природні ландшафти, зокрема степи та луки.

У 2023 році, як видно на рисунку 4, ситуація суттєво змінилася. Більшість сільськогосподарських земель характеризуються змішаними класами щільності рослинності, що свідчить про наявність рослинного покриву, проте його нерівномірність і неоднорідність вказують на припинення активної аграрної діяльності. Очевидно, що військовий конфлікт суттєво вплинув на використання земельних ресурсів, що може мати довгострокові наслідки для сільського господарства регіону.

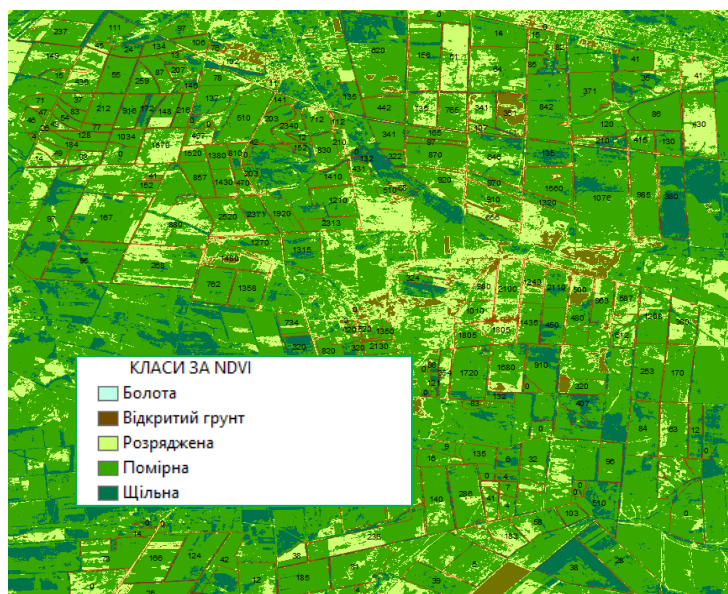


Рис. 4. Дослідження характеристик рослинності влітку 2023

Для зонально-статистичного аналізу розподілу вегетаційних індексів на сільськогосподарських територіях, у програмі *ESRI ArcGIS Desktop* використовуються спеціалізовані інструменти. Зокрема, *Tabulate Area* та *Zonal Statistic as Table* дозволяють здійснити цей аналіз і експортувати результати у вигляді електронних таблиць, рисунок 5.

| FID | Частка площі з відкритим ґрунтом у 2021 р, % | Частка площі з розрядженою рослинністю у 2021 р, % | Частка площі з помірною рослинністю у 2021 р, % | Частка площі з щільною рослинністю у 2021 р, % | Частка площі з відкритим ґрунтом у 2023 р, % | Частка площі з розрядженою рослинністю у 2023 р, % | Частка площі з помірною рослинністю у 2023 р, % | Частка площі з щільною рослинністю у 2023 р, % |
|-----|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 0   | 46,810                                       | 2,430                                              | 0,572                                           | 50,189                                         | 0,018                                        | 2,135                                              | 75,652                                          | 22,196                                         |
| 1   | 0,270                                        | 6,731                                              | 8,127                                           | 84,873                                         | 0,000                                        | 0,096                                              | 34,366                                          | 65,538                                         |
| 2   | 0,000                                        | 0,066                                              | 24,992                                          | 74,943                                         | 0,000                                        | 1,970                                              | 95,304                                          | 2,726                                          |
| 3   | 0,000                                        | 0,000                                              | 11,730                                          | 88,270                                         | 0,026                                        | 22,655                                             | 71,487                                          | 5,832                                          |
| 4   | 97,627                                       | 1,863                                              | 0,473                                           | 0,037                                          | 0,065                                        | 42,312                                             | 57,299                                          | 0,324                                          |
| 5   | 1,067                                        | 97,875                                             | 1,058                                           | 0,000                                          | 0,010                                        | 15,317                                             | 84,566                                          | 0,108                                          |
| 6   | 96,619                                       | 2,240                                              | 1,089                                           | 0,052                                          | 0,581                                        | 4,377                                              | 89,847                                          | 5,196                                          |
| 7   | 1,602                                        | 1,878                                              | 3,433                                           | 93,087                                         | 0,000                                        | 14,070                                             | 85,922                                          | 0,008                                          |
| 8   | 61,358                                       | 38,525                                             | 0,117                                           | 0,000                                          | 0,000                                        | 6,440                                              | 92,740                                          | 0,820                                          |
| 9   | 91,480                                       | 5,945                                              | 2,383                                           | 0,193                                          | 0,000                                        | 7,726                                              | 91,673                                          | 0,602                                          |

Рис. 5. Статистичні дані щодо розподілу класів щільності рослин у перших десяти ділянках: фрагмент таблиці

Масовані артилерійські обстріли суттєво змінюють рельєф, утворюючи безліч вирв різного розміру. Для їхнього дослідження застосовуються два підходи:

- геодезичні виміри безпосередньо на місцевості, що забезпечує високу точність, але через небезпеку та значні пошкодження не завжди можливий;
- використання технологій ДЗЗ, що дозволяють оперативно фіксувати вири. Під час військових дій доступ до таких даних може обмежений [6].

Обробка радарних даних із супутника *Sentinel-1* у програмному комплексі *SNAP*, який використовується для аналізу супутникових зображень, дає змогу створити цифрову модель рельєфу, як представлено на рисунку 6.

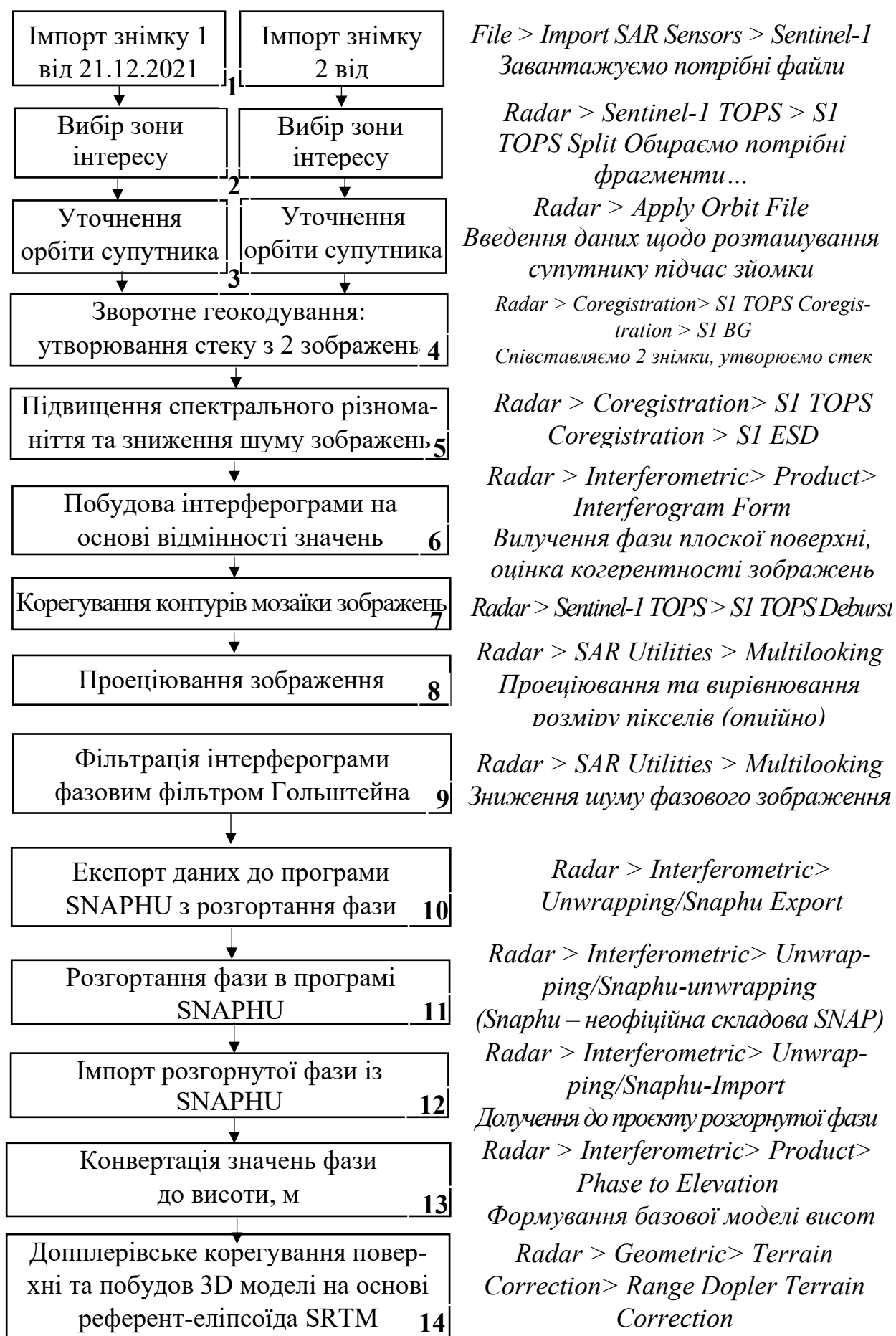


Рис. 6. Побудова моделі висот з використанням радарних даних

Для комплексного аналізу змін у формі земної поверхні в ході проведених наукових досліджень було застосовано комбінований підхід, який враховував як оптичні, так і радарні супутникові дані. Основним інструментом для отримання детального зображення висоти терену стали дані радіолокаційного супутника *Sentinel-1*, який забезпечує регулярне оновлення інформації кожні 6–12 днів для будь-якої суходільної території Землі. Ці дані доступні через відкритий ресурс *Copernicus Open Hub Access* [7].

Порівняння цифрових моделей висот дослідженої території, створених на основі даних за 2022 та 2024 роки, дозволило отримати растр деформацій земної поверхні, представлений на рисунку 7.

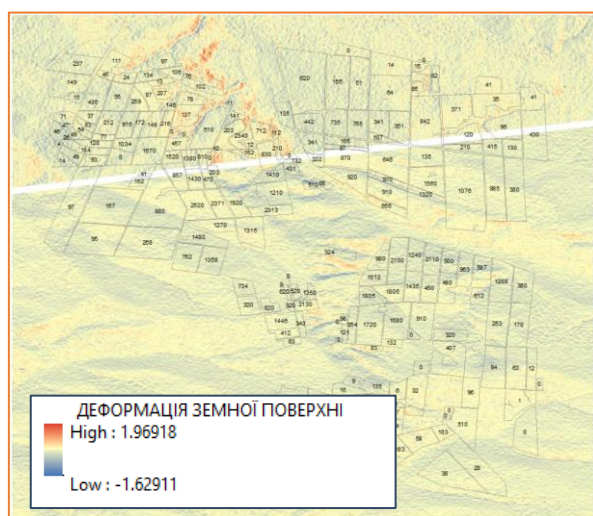


Рис. 7. Аналіз змін земної поверхні з 2022 до 2024 року

Додатково було проведено детальне статистичне дослідження площі деформацій у межах сільськогосподарських територій. Для цього використовувався метод зонального аналізу, який дозволив класифікувати зміни за рівнями інтенсивності. Результати цього аналізу наведені на рисунку 8.

| Номер ділянки | Вирви | Вирв на га | Макс. просідання поверхні | Макс. підвищення поверхні, м | Діапазон деформації, м | Середня деформації, м | Відхилення деформації, м | Частка площі з просіданням поверхні більше 0,5 м, % | Частка площі з просіданням поверхні від 0,2 до 0,5 м, % | Частка площі з деформацією поверхні від -0,2 до 0,2 м, % | Частка площі з підвищенням поверхні від 0,2 до 0,5 м, % | Частка площі з підвищенням поверхні більше 0,5 м, % |
|---------------|-------|------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 0             | 28    | 0,165      | -0,496                    | 0,494                        | 0,990                  | -0,030                | 0,141                    | 0,000                                               | 8,186                                                   | 88,981                                                   | 2,833                                                   | 0,000                                               |
| 1             | 38    | 0,228      | -0,494                    | 0,486                        | 0,980                  | 0,009                 | 0,137                    | 0,000                                               | 3,779                                                   | 90,691                                                   | 5,530                                                   | 0,000                                               |
| 2             | 103   | 3,383      | -0,477                    | 0,666                        | 1,143                  | 0,099                 | 0,154                    | 0,000                                               | 2,204                                                   | 78,810                                                   | 18,214                                                  | 0,772                                               |
| 3             | 58    | 0,765      | -0,470                    | 0,652                        | 1,123                  | 0,110                 | 0,159                    | 0,000                                               | 1,509                                                   | 75,227                                                   | 22,565                                                  | 0,699                                               |
| 4             | 183   | 1,696      | -0,487                    | 0,661                        | 1,148                  | 0,096                 | 0,172                    | 0,000                                               | 2,430                                                   | 74,646                                                   | 21,623                                                  | 1,301                                               |
| 5             | 5     | 0,049      | -0,331                    | 0,657                        | 0,988                  | 0,095                 | 0,150                    | 0,000                                               | 2,434                                                   | 78,057                                                   | 19,220                                                  | 0,288                                               |
| 6             | 39    | 0,404      | -0,335                    | 0,666                        | 1,001                  | 0,072                 | 0,153                    | 0,000                                               | 1,656                                                   | 81,318                                                   | 16,853                                                  | 0,174                                               |
| 7             | 81    | 0,639      | -0,334                    | 0,477                        | 0,811                  | 0,021                 | 0,106                    | 0,000                                               | 0,875                                                   | 97,116                                                   | 2,009                                                   | 0,000                                               |
| 8             | 4     | 0,468      | 0,000                     | 0,643                        | 0,643                  | 0,199                 | 0,113                    | 0,000                                               | 0,000                                                   | 60,098                                                   | 38,439                                                  | 1,463                                               |
| 9             | 16    | 0,385      | -0,431                    | 0,331                        | 0,762                  | -0,058                | 0,112                    | 0,000                                               | 4,860                                                   | 94,457                                                   | 0,683                                                   | 0,000                                               |
| 10            | 9     | 0,441      | -0,646                    | 0,170                        | 0,816                  | -0,178                | 0,120                    | 0,617                                               | 35,321                                                  | 64,063                                                   | 0,000                                                   | 0,000                                               |

Рис. 8. Зональна статистика для перших 10 ділянок

Природні процеси, такі як зсуви, підтоплення та ерозія, безперечно мають свій вплив на стан поверхні. Проте, враховуючи рівнинний характер

досліджуваних територій і короткий час між знімками (менше двох років), найбільш ймовірна причина масових деформацій — це інтенсивні бойові дії, які призвели до значного механічного згоряння ґрунту.

Для проведення подальшого статистичного аналізу отримані дані були збережені у форматі *.xls* та імпортовані в електронні таблиці для обчислення кореляційних залежностей (рис. 9).

| Показники                                                | Вирви  | Вирв на га | Мін. NDVI за 2023 | Макс. NDVI за 2023 | Середнє NDVI 2023 | Макс. просідання поверхні | Макс. підвищення земної поверхні | Середня деформації | Частка площі з відкритим ґрунтом у 2023 р. % | Частка площі з розорженою рослинністю у 2023 р. % | Частка площі з помірною рослинністю у 2023 р. % | Частка площі з щільною рослинністю у 2023 р. % | Частка площі з просіданням поверхні більше 0,5 м. % | Частка площі з просіданням поверхні від 0,2 до 0,5 м. % | Частка площі з деформацією поверхні від -0,2 до 0,2 м. % | Частка площі з підвищенням поверхні від 0,2 до 0,5 м. % |
|----------------------------------------------------------|--------|------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Вирви                                                    | 1,000  |            |                   |                    |                   |                           |                                  |                    |                                              |                                                   |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Вирв на га                                               | 0,735  | 1,000      |                   |                    |                   |                           |                                  |                    |                                              |                                                   |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Мін. NDVI за 2023                                        | -0,368 | -0,131     | 1,000             |                    |                   |                           |                                  |                    |                                              |                                                   |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Макс. NDVI за 2023                                       | -0,139 | -0,250     | -0,030            | 1,000              |                   |                           |                                  |                    |                                              |                                                   |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Середнє NDVI 2023                                        | -0,158 | -0,088     | 0,439             | 0,423              | 1,000             |                           |                                  |                    |                                              |                                                   |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Макс. просідання поверхні                                | -0,125 | -0,020     | 0,174             | -0,181             | 0,072             | 1,000                     |                                  |                    |                                              |                                                   |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Макс. підвищення земної поверхні                         | 0,003  | -0,030     | -0,133            | 0,167              | -0,008            | -0,067                    | 1,000                            |                    |                                              |                                                   |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Середня деформації                                       | -0,104 | -0,090     | -0,032            | 0,015              | 0,043             | 0,544                     | 0,627                            | 1,000              |                                              |                                                   |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Частка площі з відкритим ґрунтом у 2023 р. %             | 0,082  | 0,016      | -0,343            | -0,044             | -0,507            | -0,030                    | -0,077                           | -0,095             | 1,000                                        |                                                   |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Частка площі з розорженою рослинністю у 2023 р. %        | 0,076  | -0,012     | -0,425            | -0,311             | -0,796            | -0,104                    | 0,012                            | -0,049             | 0,234                                        | 1,000                                             |                                                 |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Частка площі з помірною рослинністю у 2023 р. %          | 0,011  | 0,098      | 0,356             | 0,000              | 0,866             | 0,060                     | 0,039                            | 0,064              | -0,395                                       | -0,720                                            | 1,000                                           |                                                |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Частка площі щільною рослинністю у 2023 р. %             | -0,142 | -0,134     | 0,144             | 0,409              | 0,660             | 0,054                     | -0,043                           | 0,003              | -0,086                                       | -0,301                                            | -0,403                                          | 1,000                                          |                                                     |                                                         |                                                          |                                                         |
| Частка площі з просіданням поверхні більше 0,5 м. %      | -0,079 | -0,004     | 0,187             | -0,025             | 0,051             | -0,579                    | -0,126                           | -0,539             | -0,045                                       | -0,033                                            | 0,042                                           | -0,003                                         | 1,000                                               |                                                         |                                                          |                                                         |
| Частка площі з просіданням поверхні від 0,2 до 0,5 м. %  | -0,010 | 0,018      | 0,108             | -0,028             | -0,089            | -0,663                    | -0,231                           | -0,768             | 0,084                                        | 0,061                                             | -0,030                                          | -0,065                                         | 0,717                                               | 1,000                                                   |                                                          |                                                         |
| Частка площі з деформацією поверхні від -0,2 до 0,2 м. % | 0,181  | 0,064      | -0,185            | 0,098              | 0,063             | 0,247                     | -0,390                           | -0,112             | 0,021                                        | 0,007                                             | -0,093                                          | 0,118                                          | -0,440                                              | -0,469                                                  | 1,000                                                    |                                                         |
| Частка площі з підвищенням поверхні від 0,2 до 0,5 м. %  | -0,173 | -0,099     | 0,085             | -0,027             | 0,001             | 0,258                     | 0,694                            | 0,824              | -0,087                                       | -0,050                                            | 0,129                                           | -0,093                                         | -0,205                                              | -0,370                                                  | -0,530                                                   | 1,000                                                   |
| Частка площі з підвищенням поверхні більше 0,5 м. %      | -0,093 | -0,026     | -0,033            | -0,013             | 0,034             | 0,118                     | 0,082                            | 0,550              | -0,039                                       | -0,013                                            | -0,023                                          | 0,064                                          | -0,081                                              | -0,158                                                  | -0,465                                                   | 0,513                                                   |

Рис. 9. Аналіз кореляцій між дослідженими показниками

Аналіз показав, що кількість вирв, утворених внаслідок артилерійських обстрілів на сільськогосподарських полях, безпосередньо пов'язана зі змінами рельєфу, зафіксованими на радарних знімках.

Використання таких супутникових даних із середньою роздільною здатністю дозволяє оцінювати масштаби деформації земної поверхні та потенційний вплив бойових дій на аграрні території, що може бути корисним для подальшого відновлення постраждалих ділянок.

Отримані результати інтегровані в систему геоінформаційного моделювання (ГІС) як атрибутивні дані для контурів сільськогосподарських ділянок.

Для зручності доступу та подальшого аналізу всі матеріали експортовані у веборієнтований формат *Leaflet*, який можна використовувати через спеціалізований геопортал ([http://detep.info/Mironov/ECOGIS\\_ZP\\_200524/](http://detep.info/Mironov/ECOGIS_ZP_200524/)).

Застосована технологія дозволяє не тільки візуалізувати дані, але й проводити їх інтерактивний аналіз в режимі онлайн.

**Обговорення практичних результатів виконаних досліджень та їх практична значущість.** З урахуванням поточної ситуації збройного конфлікту на території України, картографічні дані, створені в *QGIS*, набувають надзвичайної

актуальності та стають важливою складовою для розуміння та розв'язання проблем, пов'язаних із конфліктом.

Створені цифрові карти будуть корисним інструментом для науковців та дослідників у вивченні впливу війни на природне середовище та розробленні стратегій його відновлення. Крім того, вони використовуються для дослідження воєнних злочинів, що допомагає їх документувати.

Місцева влада може використовувати ці карти: для планування відновлення пошкодженої інфраструктури та ефективного управління ресурсами; для забезпечення потреб населення та попередження мешканців стосовно ризиків, пов'язаних з війною на певних територіях; для оцінки потреб постраждалих від війни людей, визначаючи найбільш уражені райони та потребу в терміновій допомозі; допоможуть планувати ефективні способи доставлення допомоги до постраждалих за найбезпечнішими маршрутами.

Використання запропонованих методів та можливостей дистанційного зондування Землі зробило моніторинг навколишнього середовища значно ефективнішим та більш точним інструментом для дослідження і оцінки стану довкілля. Застосування геоінформаційних систем та технологій дозволяє здійснювати системний аналіз різноманітних даних про навколишнє середовище, що сприятиме кращому розумінню екологічних процесів та прийняттю більш надійно обґрунтованих рішень щодо їх управління та захисту.

Відновлення порушених рослинних угруповань вимагає стратегічного підходу, що включає вибір оптимальних видів для посадки та планування заходів для відновлення екосистеми. Використання розглянутих геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє визначити види рослин, з урахуванням їх адаптації до конкретних умов, зокрема створених тривалими бойовими діями, обрахувати кількість необхідного посадкового матеріалу та розробити детальні плани відновлювальних робіт. Це дає змогу ефективніше використовувати ресурси і досягати стійких результатів у відновленні природного балансу.

Дані, що збираються, обробляються і аналізуються у запропонованій ГІС, є об'єктивними, мінімізують суб'єктивний людський фактор, характерний для візуальних спостережень і навіть експертних оцінок, та надає змогу одержувати більш точну інформацію стосовно масштабів та характеру екологічних порушень, про зміни і стан фітоценозів, оперативно реагувати на зміни екологічної ситуації та ефективно планувати відновлювальні заходи.

Оскільки запропоновані методи та засоби ДЗЗ з обробкою і аналізом отриманих у запропонованій ГІС, об'єднує різноманітні дані — зображення, картографічну інформацію, кліматичні дані — що забезпечує багатосторонній аналіз екологічного стану. Це дає системне уявлення про вплив військових дій на рослинний покрив та дозволяє розробляти довготривалі стратегії відновлення сільськогосподарських угідь.

Таким чином, дистанційний екологічний моніторинг разом з технологіями відновлення фітоценозів дозволяють ефективно відстежувати та зменшувати екологічні наслідки військових дій, сприяючи відновленню біорізноманіття і природної рівноваги на постраждалих територіях.

**Висновки.** Проаналізовано особливості методів і засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та обґрунтовано на певних прикладах їх реалізації вибір засобів для обстеження територій та земель, пошкоджених бойовими діями з наступним аналізом у спеціалізованій ГІС.

Оцінено екологічні наслідки бойових дій для земельного фонду України, на прикладі Запорізької області з використанням радіолокаційних супутникових даних *Sentinel-1*, що дозволило зафіксувати суттєві зміни рельєфу, пов'язані з вибухами, виявлено кратери від вибухів, вигорілі площі, забруднені ділянки. Зафіксовано скорочення активного землеробства, що зумовлено мінуванням, руйнуванням інфраструктури та деградацією ґрунтів. Виявлено сліди забруднення ґрунтів хімічними речовинами, паливом і мастильними матеріалами.

З використанням програмного комплексу *SAS.Planet* у геоінформаційній системі *QGIS* виконано картографічне моделювання пошкоджених земель, які для підвищення точності аналізу заподіяної ним шкоди розбивалися на ділянки загальною кількістю понад 250 з виносом їх в окремі шари цифрової карти на яких і визначалися певні характеристики рослинності, виконувався розподіл класів щільності рослин на ділянках, ступінь їх екологічної та ресурсної деградації. Окремо будувалися моделі висот з використанням радарних даних, проводився аналіз змін земної поверхні з 2022 до 2024 року, тобто вже під час бойових дій. Аналізувалася кореляція між досліджуваними показниками.

Результати виконаних досліджень показали здатність геоінформаційних технологій забезпечити достатньо точне визначення: масштабів пошкоджень; змін у землекористуванні, забрудненні ґрунтів, стані рослинності та рельєфі; площ трансформації земель, що загалом відбуваються під впливом бойових дій та необхідні для перспективного відновлення земельного ресурсу регіону.

#### Перелік посилань

1. United Nations Environment Program. (1996, May 17). *Report of the Working Group of Experts on Liability and Compensation for Environmental Damage Arising from Military Activities*. <https://digitallibrary.un.org/record/491458>
2. Інтернет-платформа «Прометеус». (n.d.). *Оцінка шкоди довкіллю від російської агресії: навчальна програма навчального курсу*. <https://certs.prometheus.org.ua>
3. United States Department of Agriculture. (2002). *Land use classification with simulated satellite photography*. *Agricultural Information Bulletin*, 352(11).
4. Хлян, Я. (2009). Практичні аспекти застосування космічних методів у моніторингу навколишнього середовища. *Геодезія, картографія та аерофотознімання: міжвідомчий науково-технічний збірник*, (71), 78–80.
5. Верховна Рада України. (2020). Закон України «Про національну програму інформатизації». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2807-20#Text>
6. Кабінет Міністрів України. (2003). *Постанова «Про заходи по створенню електронної інформаційної системи «Електронний уряд»*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/208-2003-%D0%BF#Text>
7. Horelyk, S., Netchausov, A., & Yankin, O. (2023). Визначення геометричних характеристик вибухових вирв на землях сільськогосподарського призначення дистанційними методами. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*, (4), 118–128.

### ABSTRACT

**Purpose.** To improve the accuracy of the assessment of the level and extent of pollution, damage and degradation of agricultural land as a resource component of the environment after prolonged hostilities based on geoinformation technologies.

**Research methodology.** The study was based on satellite imagery analysis and geoinformation modelling to assess the impact of hostilities on land resources of Zaporizhzhia region, as a component of its environmental security. Remote sensing methods were used to identify damaged areas, changes in land use and vegetation degradation. The analysis of vegetation indices allowed us to assess the state of the land in a dynamic way, and radar data helped us to study the deformations of the relief caused by the shelling.

**Research results.** The choice of remote sensing tools for the analysis of areas damaged by hostilities with further processing in GIS is substantiated. The environmental impact of the hostilities on the land resources of Ukraine is assessed using the Zaporizhzhya region as an example. Changes in relief, reduction of active agriculture due to mining, destruction of infrastructure and soil degradation were recorded. Soil contamination with chemicals, fuels and lubricants was identified.

**Scientific novelty.** It consists of using SAS.Planet in combination with QGIS GIS for high-precision cartographic modelling of damaged land. The regularities of changes in vegetation cover as a function of the intensity of hostilities were established, and land areas were classified according to the degree of their environmental and resource degradation during the period of hostilities in 2022–2024. Methods for building height models and automated analysis of damaged areas, including shell craters, based on their remote sensing using high-resolution radar data were further developed.

**Practical implementation.** The results confirmed the ability of geoinformation technologies to provide a sufficiently accurate determination of: the extent of damage; changes in land use, soil contamination, vegetation and relief; areas of land transformation generally affected by hostilities and necessary for the prospective restoration of land resources of the region.

**Keywords:** *geoinformation analysis, remote sensing, environmental consequences of war, land use, vegetation index (NDVI), land restoration.*