

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С. З. Гжицького
Факультет землевпорядкування та інфраструктурного розвитку
Кафедра геодезії і геоінформатики

Кваліфікаційна (дипломна) робота
освітнього ступеня «Магістр»
на тему: **«МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ
НАСЛІДКІВ ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ»**

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Виконав: студент групи ЗВ-63

Бонящук О. М.

Науковий керівник: к.е.н., доцент

Рижок З. Р.

Рецензент _____

УДК 332.3

Методичні засади застосування даних дистанційного зондування Землі для моніторингу наслідків ведення бойових дій на території України. Бонящук О.М. Кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. Львів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, 2025 р.

61 с. текстової частини, 10 рисунків, 23 джерела бібліографічного списку.

У кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні, методичні та практичні аспекти застосування даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моніторингу наслідків ведення бойових дій на території України. Визначено сутність та основні типи ДЗЗ, проаналізовано сучасні методи виявлення змін за космічними знімками та інструменти їх обробки. На основі супутникових даних Sentinel-1 та Sentinel-2 здійснено аналіз наслідків повномасштабного вторгнення 2022-2023 рр., оцінено вплив воєнних дій на галузь сільського господарства та стан екосистем. Проведено супутниковий моніторинг екологічних змін і деградаційних процесів у сільськогосподарських угіддях, спричинених бойовими діями. Апробовано алгоритм автоматичного виявлення пошкоджених сільськогосподарських полів для ідентифікації локальних пошкоджень. Виконано оцінювання рівня деградації ґрунтів та класифікацію наслідків за типами і ступенем пошкоджень, а також сформульовано рекомендації щодо використання отриманих результатів у плануванні післявоєнного відновлення.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, Sentinel-1, Sentinel-2, сільськогосподарські угіддя, відбудова.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАСЛІДКІВ ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ	8
1.1. Сутність дистанційного зондування Землі для моніторингу ведення бойових дій	8
1.2. Методи визначення змін за космічними знімками	14
1.3. Інструменти аналізу даних дистанційного зондування Землі	19
2. АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ ВІЙНИ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ	26
2.1. Супутниковий моніторинг наслідків повномасштабного вторгнення 2022–2023 років	26
2.2. Аналіз стану галузі сільського господарства під час війни	31
2.3. Супутниковий моніторинг екологічних наслідків війни для сільського господарства	38
3. ОЦІНКА ВПЛИВУ ВОЄННИХ ДІЙ НА ЗЕМЛІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ	42
3.1. Результати супутникового моніторингу для пошкоджених сільськогосподарських угідь	42
3.2. Виявлення пошкоджень сільськогосподарських угідь за даними супутникових знімків Sentinel-2	46
3.3. Аналіз та оцінка наслідків бойових дій для земель сільськогосподарського призначення за даними дистанційного зондування Землі	49
4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	52
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59

ВСТУП

У зв'язку з повномасштабною російською військовою агресією надзвичайної актуальності набуло питання чіткої просторової фіксації порушення земельних ресурсів. Наслідки влучань снарядів та ракет, пожеж, що виникли внаслідок обстрілів, військової фортифікаційної діяльності тощо, спричинили пряме пошкодження ландшафтів, а також їх хімічне забруднення. Це, в свою чергу, негативно впливає на стан довкілля та призводить до не прямих наслідків. Погіршується якість питної води та продукції рослинництва, знижується родючість ґрунтів, зменшується біорізноманіття територій.

Земельні ресурси належать до найцінніших національних багатств України, особливо враховуючи той факт, що понад 70% території країни використовується для ведення сільського господарства. Повномасштабне вторгнення російської федерації в Україну, яке розпочалося 24 лютого 2022 року, призвело до масштабних руйнувань інфраструктури, людських втрат та істотних негативних наслідків для навколишнього середовища. Найбільшого удару зазнали сільськогосподарські угіддя, які є основою продовольчої безпеки, як України, так і багатьох країн світу.

Внаслідок бойових дій значні площі орних земель були ушкоджені, або забруднені вибухонебезпечними предметами та токсичними речовинами, зруйновано іригаційні системи, а частина територій залишилася замінованою, або недоступною для господарського використання. Наслідки воєнних дій проявляються у деградації ґрунтів, втраті родючості, підвищенні рівня ерозії, а також у змінах структури землекористування.

В умовах обмеженого, або небезпечного доступу до постраждалих територій особливого значення набувають методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що дозволяють здійснювати об'єктивний, безпечний та оперативний моніторинг. Супутникові дані дають змогу фіксувати, як безпосередні пошкодження полів, так і непрямі наслідки війни, відстежувати зміни в динаміці та порівнювати їх з довоєнним станом. Застосування індексів вегетації,

спектрального аналізу, радарних та оптичних знімків дозволяє визначати масштаби пошкоджень, ступінь деградації та перспективи відновлення земель.

Актуальність дослідження зумовлена потребою у комплексній оцінці впливу воєнних дій на сільськогосподарські землі та розробці науково обґрунтованих рішень для їх відновлення. Результати аналізу на основі ДЗЗ можуть слугувати основою для прийняття управлінських рішень на державному та місцевому рівнях, планування післявоєнної відбудови аграрного сектору, зменшення екологічних ризиків та забезпечення сталого розвитку територій.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є аналіз та оцінка факторів і наслідків бойових дій для земель сільськогосподарського призначення з використанням даних дистанційного зондування Землі, визначення рівня пошкодження та розробка рекомендацій для їх відновлення.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАСЛІДКІВ ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ

1.1. Сутність дистанційного зондування Землі для моніторингу ведення бойових дій

Війна в Україні надала великого значення супутниковим знімкам. Тривалий час їх використовували здебільшого для розвідувальних потреб, але на сьогодні вони пронизують усі аспекти збройних протистоянь. Їхня роль у впливі на перебіг бойових дій зростатиме, адже прогрес у їхньому використанні робить автоматизований аналіз дедалі реальнішим.

Не зважаючи на значну увагу до знімків з високою просторовою роздільною здатністю, дослідження вільно доступних супутникових знімків із помірною просторовою, але високою часовою роздільною здатністю, можуть призвести до більш масштабованих рішень. Дослідження таких зображень слід зробити пріоритетом, оскільки це матиме більший позитивний вплив на суспільство.

Супутникові знімки стали не від'ємною частиною будь-якого збройного конфлікту. Хоча військові та розвідувальні служби вже давно застосовують космічні знімки для тактичних і стратегічних задач, комерціалізація супутників в останні десятиліття перетворила їх на цінний ресурс даних для все більшої кількості організацій. Набагато менш нав'язливі, ніж інші види дистанційного зондування Землі, наприклад, камери на безпілотноках, супутники часто є єдиним способом, щоб зібрати об'єктивні дані із зон бойових дій, навіть якщо вони фіксують знімки лише в певний момент часу.

Війна в Україні підкреслила значення супутникових знімків у збройних конфліктах. Зображення скупчення російських військ на кордоні України перед вторгненням викликали тривогу у військових штабах, але також були представлені у провідних ЗМІ. Супутникові знімки війни широко поширювалися

як у традиційних ЗМІ, так і в соціальних мережах, формуючи громадську думку і, відповідно, рішення політиків щодо військової підтримки, санкцій і прийнятності потенційної мирної угоди.

Дистанційне зондування Землі – це процес збирання інформації про об'єкти на Землі за допомогою сигналів, які випромінюються, або відбиваються від цих об'єктів. У контексті воєнних операцій в Україні дистанційне зондування стало важливим інструментом для оцінки збитків та руйнувань, що відбуваються під час бойових дій [8].

Одним з основних методів дистанційного зондування, що використовуються в контексті воєнних операцій в Україні, є аналіз знімків, отриманих із супутників та літаків. Ці зображення надають детальну інформацію про стан територій, що постраждали від війни. Використовуючи спеціалізовані алгоритми обробки знімків, можна визначити масштаби руйнувань, оцінити кількість пошкоджених будівель, доріг, інфраструктури та інших об'єктів. Крім того, супутникові дані можуть бути використані для моніторингу переміщення військ та техніки, виявлення зон діяльності та локалізації потенційних загроз. Це дозволяє швидко реагувати на дії противника та зменшує ризик для цивільного населення. Окрім супутникових знімків, також використовуються радіолокаційні дані, які надають інформацію про рельєф місцевості, структуру поверхні та можливі пошкодження.

Радіолокаційне зондування – це активний метод збору даних, який передбачає випромінювання сигналу в напрямку об'єкта та подальше отримання його відбиття. Цей процес надає інформацію про характеристики поверхні та об'єктів на ній, такі як рельєф місцевості, структура та матеріал. У військовому контексті в Україні радіолокаційна візуалізація може бути вирішальним інструментом для збору інформації про місце знаходження ворожих сил, виявлення потенційних загроз, оцінки збитків та змін рельєфу місцевості.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) представляє сукупність методів отримання інформації про об'єкти, або явища на поверхні Землі без безпосереднього контакту з ними, шляхом реєстрації та аналізу

електромагнітного випромінювання, яке відбивається, поглинається, або випромінюється цими об'єктами. Найчастіше джерелом даних ДЗЗ є супутники або літальні апарати, у тому числі літаки, дрони, що обладнані спеціальними сенсорами.

Суть ДЗЗ полягає у зборі даних на відстані за допомогою сенсорів, які можуть бути пасивними та реєструють природне сонячне випромінювання, або активними, що самостійно випромінюють сигнал і реєструють його відбиття, як у радіолокаційних системах.

Основні етапи процесу ДЗЗ передбачають:

1. збирання даних (зйомка супутниковими сенсорами);
2. передача даних на наземні станції;
3. обробка та корекція зображень (геометрична, радіометрична);
4. аналіз та інтерпретація отриманих даних;
5. візуалізація (створення карт, індексів, класифікацій тощо).

Класифікацію типів ДЗЗ проводять за:

1. джерелом енергії:

- пасивне – сенсори реєструють природне (сонячне) електромагнітне випромінювання, відбите об'єктами (Sentinel-2, Landsat-8, MODIS);

- активне – сенсори самостійно випромінюють сигнал і фіксують його відбиття (Sentinel-1 – SAR (Synthetic Aperture Radar));

2. типом платформи:

- космічне (з супутників) – найпоширеніше, регулярне оновлення знімків;
- авіаційне (з літаків або БПЛА) – висока роздільна здатність, гнучке використання;

- наземне (мобільні або стаціонарні платформи) – локальні дослідження;

3. діапазоном електромагнітного спектра:

- оптичне (видиме світло) – дозволяє створювати візуально зрозумілі зображення;

- інфрачервоне (NIR, SWIR, TIR) – використовується для аналізу рослинності, вологості, температури;

- радіолокаційне (SAR) – ефективне за будь-яких погодних умов і вночі;
- гіперспектральне – реєструє сотні спектральних каналів, що дає змогу детально ідентифікувати матеріали на поверхні Землі;

4. просторовою роздільною здатністю:

- низька (>100 м) – MODIS, AVHRR для глобального моніторингу;
- середня (10–30 м) – Landsat, Sentinel для моніторингу змін земного покриття;
- висока/надвисока (<10 м) – WorldView, Pleiades, дрони для детального аналізу об'єктів.

Дистанційне зондування використовується у багатьох галузях, в тому числі у сільському господарстві, моніторингу лісів, геології, містобудуванні, охороні довкілля, надзвичайних ситуаціях, а також для моніторингу наслідків бойових дій, що особливо актуально для України.

Завдяки доступності відкритих супутникових даних, наприклад, Sentinel-1/2, Landsat, а також безкоштовним сервісам таким, як Google Earth Engine, EO Browser, ДЗЗ стало ефективним інструментом для оперативного оцінювання пошкоджень інфраструктури, виявлення пожеж, забруднень і змін у землекористуванні внаслідок військових дій.

Лідарне зондування – це активний спосіб збору інформації про поверхню, заснований на постійному вимірюванні віддзеркалення від освітленої області. Цей метод застосовує монохроматичне лазерне випромінювання фіксованої довжини хвилі. Зазвичай, лідарне зондування виконується з висоти польоту. Окрім знімків, для оцінювання збитків також використовують дані геоінформаційної системи (ГІС). ГІС дає змогу інтегрувати інформацію дистанційного зондування Землі з іншими геоданими, як-от карти, дані про населення, розміщення інфраструктури, що сприяє створенню комплексних моделей збитків, аналізу їх впливу на людей та розробці стратегій післявоєнного відновлення [3].

У контексті військових дій в Україні методи дистанційного зондування Землі мають значний потенціал для збирання об'єктивної та актуальної

інформації про збитки. Вони сприяють управлінню військовими операціями, оцінці гуманітарних потреб та розподілу допомоги. Крім того, вони надають об'єктивні дані для фіксування воєнних злочинів та порушень міжнародного гуманітарного права.

Моніторинг і оцінка збитків за допомогою дистанційного зондування під час війни в Україні має вирішальне значення для здобуття об'єктивної інформації про руйнування, спустошення, зміни ландшафту та інфраструктури. Протягом десяти років війни в Україні використання методів дистанційного зондування стало не від'ємною частиною процесу відбудови та реконструкції країни. Ця методологія передбачає використання супутникових знімків та інших інструментів дистанційного зондування для збору даних про пошкодження будівель, інфраструктури та ландшафту у великих масштабах.

Завдяки високій роздільній здатності супутникових знімків можна виявити навіть не значні зміни в географічному просторі, як-от руйнування будівель, пошкодження доріг, мостів, аеропортів та іншої інфраструктури, а також зміни ландшафту та знищення рослинності. Окрім того, комбінування супутникових знімків з іншими джерелами даних, як-от дані радіолокації, дані лідара або дані геоінформаційної системи (ГІС), дає змогу отримати повніше розуміння збитків.

Прикладами застосування методів дистанційного зондування Землі для моніторингу та оцінки руйнувань під час війни в Україні є моніторинг:

1. пошкоджень будівель та інфраструктури. За допомогою супутникових знімків можливо виявити пошкодження будівель, доріг, мостів та інших об'єктів інфраструктури. Зміни у структурі та формі цих об'єктів можна використовувати для оцінки рівня руйнувань та планування відновлення;

2. змін у навколишньому середовищі – дистанційне зондування Землі дає змогу виявляти зміни в природному середовищі, як-от вирубка лісів, забруднення водойм, зміни рослинного покриву тощо, які можуть бути наслідком військових дій. Це дозволяє визначити екологічні наслідки конфлікту та спланувати заходи щодо відновлення довкілля;

3. гуманітарних зон, що допомагає виявляти де війна призводить до масового переміщення населення чи гуманітарної кризи. Супутникові знімки та аналіз даних дозволяють виявляти зміни в розташуванні тимчасового житла, наметових таборів та інших гуманітарних зон, що сприяє організації необхідної допомоги та ресурсів;

4. впливу на населення, що може допомогти в оцінці впливу військових дій на населення. Це охоплює аналіз змін у розподілі та чисельності населення. Дистанційне зондування можна використовувати для виявлення переміщення військової техніки та зброї в зонах конфлікту. Ця цінна інформація може виявити масштаби та розташування військових сил, визначити потенційні зони збройного конфлікту та сприяти моніторингу дотримання міжнародних угод.

5. мін та небезпечних зон – дистанційне зондування може сприяти виявленню мінних полів та небезпечних зон, які створюють загрозу для місцевого населення [10].

Моніторинг та оцінка масштабів руйнувань за допомогою методів дистанційного зондування Землі під час війни в Україні є надзвичайно важливим інструментом. Використання супутникових знімків, лідара, радара та геоінформаційних систем (ГІС) дає змогу отримувати об'єктивну інформацію про зміни ландшафту та об'єктів на земній поверхні. Це сприяє точному визначенню пошкоджень, таких як руйнування будівель, зруйнована інфраструктура та повені, а також оцінювати їх просторовий розподіл.

Застосовуючи ці методи, можна ефективно відстежувати динаміку руйнувань та прогнозувати потенційні наслідки для людей, інфраструктури та природних ресурсів. Це сприяє швидкому реагуванню на надзвичайні ситуації, організації рятувальних операцій та впровадженню відновлювальних заходів після військових дій.

Хоча, значна частина досліджень дистанційного зондування Землі у збройних конфліктах зосереджена на зображеннях з високою просторовою роздільною здатністю, проте вільно доступні зображення з помірною просторовою, але високою часовою роздільною здатністю пропонують найбільш

реальний шлях до систематичного моніторингу великих конфліктних зон майже в реальному часі, особливо якщо для поєднання інформації, що міститься на зображеннях оптичних та радіолокаційних систем із синтезованою апертурою, використовуються моделі штучного інтелекту. Досягнення високої повноти та точності в таких моделях становить значний виклик у найближчому майбутньому [2].

1.2. Методи визначення змін за космічними знімками

Виявлення змін за допомогою даних дистанційного зондування Землі полягає у визначенні розбіжностей у стані земної поверхні, зафіксованих у різні проміжки часу. Цей підхід використовується для відстеження змін у ландшафтах, процесів урбанізації, стану рослинності, а також для вивчення наслідків природних катастроф, техногенних аварій та бойових дій.

Загальна ідея методів базується на порівнянні супутникових зображень однієї й тієї ж території, отриманих у різний час, з подальшим виділенням суттєвих відмінностей на основі спектральних, структурних, або статистичних характеристик.

Визначення просторово-часових змін на земній поверхні з використанням даних дистанційного зондування Землі є важливим компонентом екологічного, інфраструктурного та геоінформаційного моніторингу, особливо в умовах військових дій. Основна методика таких досліджень включає аналіз змін у спектральних, радіометричних або структурних характеристиках зображень, отриманих у різні моменти часу.

Одним з ключових підходів є індексний аналіз, в якому використовуються нормалізовані спектральні індекси, обчислені за допомогою різних каналів багато спектральної зйомки. Наприклад, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) активно застосовується для виявлення змін у рослинному покриві, в той час як NBR (Normalized Burn Ratio) дає змогу оцінити наслідки пожеж. Індекс NDBI (Normalized Difference Built-up Index) чутливий до змін у забудованій

місцевості, а NDWI (Normalized Difference Water Index) – до динаміки водних об'єктів. Для виявлення змін обчислюється різниця значень відповідного індексу між двома датами, наприклад, NDVI, що дозволяє визначити масштаби та локалізацію змін.

У спектральному підході також використовуються статистичні методи, зокрема t-тест (Student's t-test), який дозволяє виявити статистично значущі відмінності у відображенні окремих ділянок території між зображеннями до та після події. Цей метод не потребує попередньої класифікації, є формалізованим та дає змогу визначити ділянки з суттєвими змінами інтенсивності відбитого сигналу [11].

При використанні радіолокаційних даних, наприклад, з супутників Sentinel-1, ефективним є метод аналізу когерентності (Coherence Change Detection). Він базується на порівнянні фази сигналу між двома SAR-зображеннями. Зменшення когерентності вказує на структурні зміни на поверхні, наприклад, на руйнування будівель або переміщення ґрунту. Такий підхід особливо корисний в умовах хмарності, або в темний час доби, коли оптична зйомка неможлива.

Сучасним трендом є застосування методів штучного інтелекту для автоматизованого виявлення змін. Зокрема, алгоритми класифікації та семантичної сегментації дозволяють аналізувати великі масиви зображень, розпізнавати об'єкти, визначати ступінь руйнувань та автоматично формувати карти змін. Ці методи можуть бути реалізовані в середовищах Google Earth Engine, Python або спеціалізованих ГІС-системах.

В цілому, вибір конкретного методу визначення змін за супутниковими знімками залежить від поставлених завдань, характеристик досліджуваної території, типу доступних даних (оптичні чи радарні), а також від технічних можливостей обробки знімків. Комплексне застосування кількох підходів у рамках інтегрованої методики дозволяє досягти високої точності просторової локалізації та кількісної оцінки змін, що є особливо актуальним для моніторингу територій, які зазнали впливу бойових дій.

У багатьох країнах, що мають доступ до космічної техніки та технологій дистанційного зондування, застосування аерокосмічного моніторингу закріплено на державному рівні. Можливості дистанційних методів постійно розширюються, що стосується:

- застосування різних сенсорів з високою геометричною та радіометричною якістю (багато спектральних, гіпер спектральних, оптичних, радіолокаційних, надвисокочастотних та інших);
- суттєвого прискорення знімальних робіт на територіях з надзвичайними ситуаціями (замість кількох днів – декілька годин);
- швидкого обміну інформацією завдяки сучасним мережевим та гео порталним веб технологіям;
- значно меншої залежності знімальних процесів від освітлення та погодних умов, що пов'язано з використанням випромінювання в радіодіапазоні.

Віднесення об'єкта до конкретної класифікаційної групи відбувається на основі набору правил, сформованих з властивостей та характеристик зображення, яке обробляється. Інтерпретація використовує логічні категорії, які базуються на корелятивних зв'язках між компонентами ландшафту. Прийняття рішень у тематичному дешифруванні, переважно, пов'язане з графічним виділенням поточного об'єкта. При цьому для виділення об'єктів (поділу космічного знімка на однорідні області), сегментації зображень та подальшої класифікації об'єктів, найчастіше потрібно послідовно вирішити ряд завдань, а саме [9]:

1. виділення контурів на космічному знімку;
2. визначення меж об'єктів;
3. сегментація зображення;
4. класифікація та розпізнавання областей;
5. виявлення змін у областях на космічному знімку.

Після вирішення усіх цих завдань можливе точне дешифрування та аналіз космічних знімків. Після сегментації, коли зображення представляє собою набір взаємо непересічних областей, необхідно провести їх класифікацію. Загальна

схема побудови класифікатора, коли вводяться припущення про статистичні, структурні та інші властивості ознак. Далі для кожного класу об'єктів на основі наявних даних будується функція, що відображає вірогідність належності точки простору до вибраного класу. Рішення про віднесення вектора ознак до певного класу ухвалюють, порівнюючи значення функцій у всіх класах. Сумарний ризик обчислюється, як частка помилкових відповідей побудованого вирішального правила на навчальній вибірці. Цей підхід потребує виконання класифікації в специфічних умовах. Як класифікатори можуть використовуватися різні стратегії, в тому числі від класифікаторів за мінімальною відстанню до ієрархічних деревоподібних класифікаторів, або класифікаторів на основі нейронної мережі.

Основні складнощі у пошуку відмінностей, або зон змін на супутникових знімках одного й того ж району, отриманих у різні моменти часу, пов'язані, перш за все, з різними умовами зйомки, через які різні знімки можуть мати:

- різну просторову роздільну здатність через те, що вони були створені під різними кутами;
- різну яскравість через зйомку за різних умов освітленості;
- дещо відмінні калібрування через зйомку з різних космічних апаратів.

Безумовно, ці розбіжності зазвичай не значні та не суттєві для вивчення динаміки великих об'єктів. Однак, навіть не значні зміни умов зйомки мають вплив на виявлення змін на межі просторової розрізненості, або на межі чутливості приладів. Тому, в таких ситуаціях не завжди вдається знайти зони змін, використовуючи простий аналіз різниць між досліджуваними знімками, оскільки надзвичайно важко відокремити зміни, пов'язані зі зміною умов зйомки, від змін реальних об'єктів. Отже, для пошуку областей змін необхідне використання спеціальних алгоритмів. Ці алгоритми, передусім, повинні характеризуватися стійкістю до змін умов зйомки та калібрування.

Одним з найважливіших показників якості зображення є контраст, який визначається, як різниця між максимальним та мінімальним значеннями діапазону яскравості. Для отримання надійних результатів аналізу космічних

знімків, тематична обробка передбачає ряд операцій, націлених на підвищення контрасту зображення досліджуваного об'єкта відносно фону, на якому він розташований. До таких операцій належить експонетричний розрахунок, який виконується перед зйомкою земної поверхні для вибору оптимальних параметрів реєстрації оптичного випромінювання з бортової оптико-електронної апаратури. Альтернативний підхід передбачає проведення попередніх процедур цифрової обробки зображень на наземних комплексах. Наприклад, підвищення контрасту може бути досягнуто за допомогою перетворень, таких як лінійне розтягування, нормалізація, лінеаризація гістограми зображення [8].

Просторова роздільна здатність — це ключова характеристика супутникових знімків, визначаючи розмір об'єктів, які можливо розпізнати на знімку. Проте, інші характеристики такі, як аналіз умов спектральної чи часової роздільної здатності, набувають значущості з розвитком штучного інтелекту. Варто розрізняти зображення з високою просторовою роздільною здатністю (менше 5 м), помірною просторовою роздільною здатністю (5–30 м) та низькою роздільною здатністю (більше 30 м). Також існують знімки з різною спектральною роздільною здатністю, що стосується охоплених інтервалів довжин хвиль.

У той час, як оптичні датчики фіксують відбиття сонячного світла від земної поверхні, датчики радіолокатора із синтезованою апертурою (SAR) активно випромінюють мікрохвильовий сигнал. Тому, вони можуть створювати зображення не залежно від сонячного освітлення та крізь хмари, а принцип картографування похилої дальності SAR здатний виявляти ледь помітні зміни, які не видимі з оптичної перспективи. Наприклад, зруйновану будівлю з не ушкодженим дахом навряд чи можна виявити, як пошкоджену на оптичному знімку, тоді як дані з SAR-зоніmkів дозволять її ідентифікувати.

Більшість досліджень структурних пошкоджень здійснюються за допомогою оптичних знімків, але останнім часом спостерігається зростання досліджень, заснованих на SAR-даних. Це відповідає більш загальній тенденції в дослідженнях дистанційного зондування Землі та значною мірою пов'язано з

появою методів на основі штучного інтелекту, які можуть використовувати інформацію, що міститься в SAR.

Довгий час використання SAR-знімків, як частини автоматизованого аналізу було складним з декількох причин, зокрема через специфіку процесу генерації SAR-даних, оскільки значення інтенсивності пікселя SAR-знімка – це сума всіх сигналів, що повертаються на супутник у межах комірки роздільної здатності. Не великі, часто металеві об'єкти всередині комірки можуть різко збільшити амплітуду зворотно розсіяного сигналу. Сусідні комірки, без таких потужних розсіювачів матимуть значно нижчу інтенсивність, що призводить до появи темних і світлих інтенсивностей зображень безпосередньо поруч на SAR-знімкові. Це явище відоме, як ефект плямистості, що виглядає як зернистий шум у текстурі зображення. Цей ефект часто вважається не бажаним, але насправді є реальним сигналом і має велику цінність для виявлення змін на основі штучного інтелекту [2].

Оскільки не значні пошкодження об'єктів у межах однієї комірки роздільної здатності SAR-знімку приводять до потенційно значних змін у загальній сумі сигналу, тобто інтенсивності зображення на певному пікселі, то можна виявити зміни субпіксельного розміру, що відкриває перспективу для досліджень, включаючи потенційне використання інтерферометричних методів SAR.

1.3. Інструменти аналізу даних дистанційного зондування Землі

Інструменти для аналізу даних дистанційного зондування Землі є критичними для виявлення змін на поверхні планети, зокрема тих, що виникли внаслідок воєнних дій. Найбільш поширені засоби охоплюють, як спеціалізоване програмне забезпечення, так і хмарні сервіси разом із мовами програмування.

Одним з основних інструментів є SNAP (Sentinel Application Platform), розроблений Європейською космічною агенцією для роботи з даними супутників Sentinel-1, Sentinel-2 та Sentinel-3. Він підтримує повний цикл

обробки оптичних і радарних зображень, включно з корекцією, фільтрацією, обчисленням індексів та аналізом когерентності. Його часто використовують для обробки SAR-даних при моніторингу руйнувань, спричинених конфліктом.

QGIS (Quantum GIS) – це багато функціональна геоінформаційна система, що дозволяє обробляти, як растрові, так і векторні дані. Вона підтримує плагіни для супутникового аналізу, зокрема для візуалізації NDVI, класифікації знімків, створення карт змін та інтеграції з Python. QGIS часто застосовують для побудови тематичних карт та роботи з великими просторовими базами даних, зокрема для відображення наслідків бойових дій.

Google Earth Engine – це хмарна платформа для обробки супутникових даних у великому масштабі. Вона дозволяє отримувати доступ до архівів даних із супутників Sentinel, Landsat, MODIS та інших, а також виконувати обчислення без потреби у потужному комп'ютері. Робота в середовищі ведеться за допомогою JavaScript або Python. GEE набула особливої популярності завдяки можливості порівнювати знімки до і після, обчислювати індекси змін, будувати графіки та інтерактивні карти, важливі для оцінки шкоди від бойових дій.

Для швидкого онлайн-перегляду супутникових знімків та їх аналізу без спеціалізованого програмного забезпечення часто застосовують EO Browser. Це веб сервіс, який дає змогу обирати територію, переглядати супутникові знімки різних дат, застосовувати готові індекси (NDVI, NDWI, NBR тощо), порівнювати зображення в динаміці та завантажувати готові продукти.

Ще одним важливим напрямом є використання мови програмування Python для обробки супутникових знімків. Зокрема, бібліотеки rasterio, gdal, geopandas, scikit-learn та earthpy, що дають змогу створювати автоматизовані алгоритми аналізу, виконувати класифікацію, обробку даних та візуалізацію результатів. Python є гнучким і потужним інструментом, особливо у поєднанні з API Google Earth Engine, що дозволяє комплексно аналізувати дані про зміни, спричинені війною.

Окрім, відкритих інструментів, у професійному середовищі активно використовуються комерційні програмні продукти, такі як ENVI та ERDAS

IMAGINE. Вони мають широкий набір функцій для класифікації, побудови індексів, аналізу змін і роботи з гіпер спектральними даними. Проте, їхнє використання обмежене через високу вартість ліцензії, що впливає на доступність для багатьох користувачів.

Для ефективного аналізу наслідків бойових дій на основі супутникових знімків, рекомендується застосовувати поєднання різних інструментів. Наприклад, початкову обробку можна здійснити в SNAP, картографічну візуалізацію – у QGIS, автоматизований аналіз – у Python або Google Earth Engine, а візуальне порівняння – в EO Browser. Такий комплексний підхід забезпечує точність, гнучкість та масштабованість процесу моніторингу, допомагаючи оцінювати та відстежувати наслідки військових дій.

Copernicus Browser – це безкоштовна веб-платформа у середовищі Copernicus Data Space Ecosystem, як і платформа EO Browser, що дозволяє переглядати онлайн-знімки середньої та низької просторової роздільної здатності від Європейської космічної агенції (ESA – European Space Agency). Copernicus Browser поєднує функціональні та аналітичні можливості EO Browser з доступом до актуального та повного архіву даних місій Sentinel1, Sentinel2, Sentinel3, Sentinel5P та Copernicus Contributing, що включає пошук та завантаження.

Sentinel1 – це група супутників SAR (Synthetic aperture radar) Європейської космічної агенції (ESA) С-діапазону, що складалася з двох ідентичних супутників на полярних орбітах Sentinel1A та Sentinel1B, які працюють на центральній частоті 5,405 ГГц (довжина хвилі – приблизно 5,547 см). У грудні 2021 року супутник Sentinel1B припинив спостереження через серйозну аварію, а згодом був виведений з орбіти. В розпорядженні ESA залишився Sentinel1A, що продовжує виконання моніторингової місії. ESA для компенсації втрати Sentinel1B планує запуск нового радарного супутника Sentinel1C.

Супутники Sentinel1 обладнані CSAR – радаром із синтезованою апертурою С-діапазону. Цей інструмент складається з електронної підсистеми SAR (SES), що відповідає за керування радіолокаційними командами та обробку

даних, та антенної підсистеми SAR (SAS), що відповідає за випромінювання та прийом сигналу. CSAR має чотири режими спостереження, кожен з різною смугою та роздільною здатністю відповідно до мети:

1. Stripmap (SM) – режим смугового огляду,
2. Interferometric Wide swath (IW) – інтерферометричний широкосмуговий режим,
3. Extra Wide swath (EW) – надширокосмуговий режим,
4. Wave (WV) – хвильовий режим.

Режим SM призначений для підтримки місії ERS (European Remote Sensing) та Envisat, режим IW є режимом за замовчуванням для спостереження над суходолом, режим EW призначений для спостереження за морем, льодовиками та полярними зонами, де потрібне широке покриття та висока часова роздільна здатність; режим WV є режимом за замовчуванням для спостереження над відкритим океаном.

Режими SM, IW та EW пропонують одинарну (HH або VV) та подвійну (HH + HV або VV + VH) поляризацію, режим WV пропонує лише одну поляризацію (HH або VV) [3].

Здатність SAR-радарів здійснювати спостереження крізь щільний хмарний покрив робить їх ідеальними інструментами для моніторингу повеней та підтоплень. Їх можна використовувати для оцінки масштабів затоплення територій та визначення впливу на людські, економічні та екологічні втрати. Дані SAR, як і супутникові знімки, отримані за допомогою оптичних сенсорів (Sentinel2, Sentinel3), здебільшого використовуються для виявлення поширення підтоплень. Проте, система SAR перевершує оптичні датчики, адже збирає інформацію як вдень, так і вночі, не залежно від погодних умов. Основні галузі використання даних, отриманих за допомогою Sentinel1:

- ✓ виявлення та моніторинг розливів нафти;
- ✓ картографування морського льодовиків;
- ✓ моніторинг зміщень земної поверхні;
- ✓ картографування змін земного покриття;

- ✓ спостереження за морськими суднами;
- ✓ картографування лісів;
- ✓ спостереження за природними лихами.

Програма SNAP (Sentinel Application Platform) призначена для обробки даних з супутників Sentinel1, Sentinel2, Sentinel3, SMOS, PROBA V та інших.

Набори інструментів ESA підтримують наукову експлуатацію місій Sentinels 1, 2, 3, ERS, ENVISAT та інших. Три набори інструментів називаються відповідно Sentinel 1, 2 та 3 Toolboxes і мають спільну архітектуру під назвою SNAP. Архітектура SNAP оптимально підходить для обробки та аналізу даних спостереження за Землею завдяки технологічним інноваціям, серед яких розширюваність, портативність, модульна клієнтська платформа, загальна абстракція даних про дослідження Землі, керована пам'ять та опції обробки графіків [9].

Її ключовими перевагами є:

- швидке відображення зображень і навігація навіть для гіга піксельних знімків;
- Graph Processing Framework (GPF) для створення користувацьких ланцюжків обробки;
- вдосконалене управління шарами, що дає змогу додавати та змінювати нові накладення, такі як знімки з інших діапазонів, зображення формату WMS із серверів, або шейп файлів ESRI;
- визначення будь-яких областей інтересу для статистики та різноманітних графіків;
- просте визначення та накладення бітових масок;
- гнучка арифметика даних окремих смуг з використанням довільних математичних виразів;
- точне відтворення та орто трансформування в оптимальні картографічні проєкції;
- геокодування та корекція з використанням наземних контрольних точок;

- автоматичне завантаження матриці висот SRTM та вибір тайлів;
- бібліотека продуктів для ефективного сканування та каталогізації великих архівів;
- підтримка багато потоковості та багато ядерних процесорів;
- інтегрована візуалізація WorldWind.

Програма QGIS – це безкоштовна геоінформаційна система з відкритим кодом та гнучкою системою функціональних модулів, яка підтримується та активно вдосконалюється спільнотою розробників-волонтерів. Ця програма дає змогу візуалізувати, редагувати, аналізувати дані, оформлювати карти для друку та багато іншого [11].

Більшість функцій в QGIS реалізовані, як основні, або зовнішні модулі:

- основні модулі розробляються командою розробників QGIS та автоматично входять до кожного нового релізу програми;
- зовнішні модулі перебувають у зовнішніх репозиторіях та підтримуються авторами-волонтерами. Якщо модуль є популярним серед користувачів, його можуть додати до набору основних модулів QGIS.

QGIS має низку переваг, які роблять його одним з найпопулярніших інструментів для аналізу просторових даних та супутникових знімків. Насамперед, це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим кодом, що дозволяє вільно використовувати його як у навчальних, так і в професійних цілях без обмежень. Його інтерфейс зручний і водночас достатньо функціональний для виконання складних аналітичних задач. QGIS підтримує роботу з великою кількістю форматів растрових і векторних даних, включаючи GeoTIFF, Shapefile, KML, GeoJSON та інші, що забезпечує гнучкість при роботі з інформацією з різних джерел.

Важливою перевагою є розвинена система плагінів, які значно розширюють функціонал програми. Зокрема, за допомогою додаткових модулів можна виконувати класифікацію супутникових знімків, розрахунок індексів вегетації, автоматизований аналіз змін, підключення до WMS та WFS сервісів для отримання онлайн-карт, а також інтеграцію з іншими ГІС-програмами та

бібліотеками Python. Програма дозволяє створювати точні тематичні карти з високим рівнем кастомізації, додаючи умовні позначення, масштаб, легенду, графіки та текстові блоки.

QGIS активно використовується в наукових дослідженнях, екологічному моніторингу, землевпорядкуванні, урбаністиці, агрономії та інших галузях, де важливий геопросторовий аналіз. Його стабільна робота, постійне оновлення, підтримка спільноти користувачів та інтеграція з такими платформами, як GRASS GIS та SAGA GIS, роблять його універсальним інструментом для моніторингу за веденням бойових дій [3].

2. АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ ВІЙНИ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

2.1. Супутниковий моніторинг наслідків повномасштабного вторгнення 2022–2023 років

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну, що почалося 24 лютого 2022 року, ознаменувало старт високо інтенсивної війни на європейському континенті. Це стало порушенням десятиліть мирного співіснування у західному світі, поставило під загрозу продовольчу безпеку планети та дестабілізувало і без того не стабільну світову економіку. Впродовж декількох місяців російські війська захопили території Луганська, Донецька, Запоріжжя та Херсона, доповнивши вже анексований Крим (з 2014 року). Після успішного контрнаступу України, який повернув контроль над територіями на північ від Києва та на схід від Харкова до Куп'янська та правого берега Дніпра (листопад 2022 року), конфлікт перейшов у формат позиційної війни, що нагадує часи Другої світової, забравши десятки тисяч життів з обох сторін. Результати другого українського контрнаступу, що розпочався на початку червня 2023 року, поки що залишаються не визначеними.

Російсько-українська війна – це перший військовий конфлікт високої інтенсивності в ХХІ столітті, який відбувається в умовах широкого розповсюдження соціальних мереж. Вперше інформація з передової стає доступною в режимі реального часу та поширюється безпосередньо сторонами конфлікту. Дрони активно використовуються, як новітня військова технологія, надаючи знімки військових операцій, що сприяють визначенню просування військ та їх втрат. Велика кількість загальнодоступної інформації з передової перетворила розвідку з відкритих джерел (OSINT) на стратегічний військовий актив та інструмент ведення інформаційної війни. Військова карта, зображена на рис. 2.1, що відображає розташування російських оборонних ліній, важливих

військових об'єктів та хронологію окупації територій, сформована виключно з відкритих джерел.

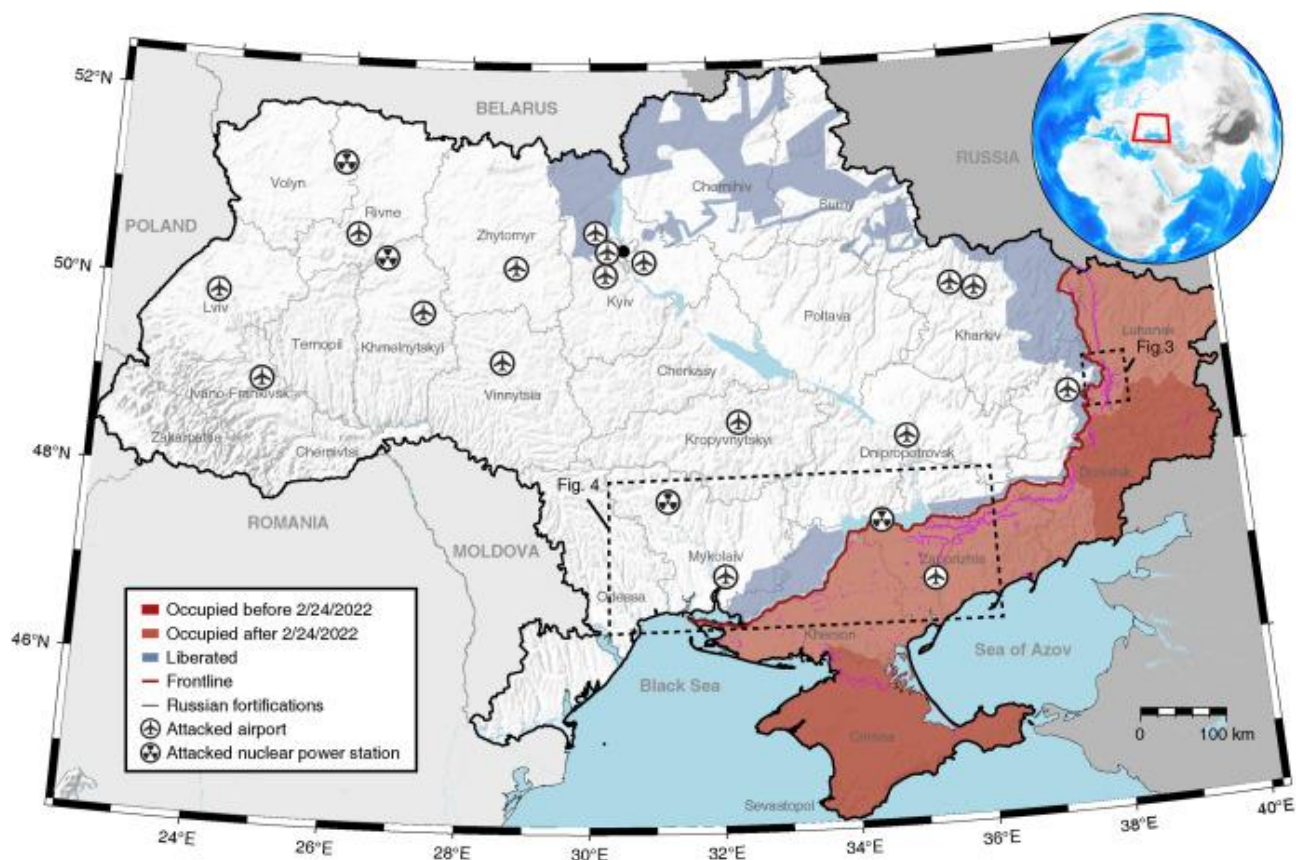


Рисунок 2.1. – Карта російсько-української війни станом на вересень 2023 року.

На рис.2.1 візуально показано розподіл звільнених земель (виділені синім кольором) та окупованих територій (позначені червоним кольором). Відмічено місця ракетних ударів, що припали на об'єкти цивільної інфраструктури, зокрема аеропорти та атомні електростанції. Лінія фронту на мапі вказана червоною лінією, а російські оборонні позиції позначені фіолетовим кольором. Усі дані отримані з розвідувальних джерел відкритого доступу (OSINT).

На рис. 2.2 представлено порівняння усереднених за місяць знімків при нічному освітленні, отриманих до та після лютого 2022 року, що є визначальною датою російського вторгнення. У сусідніх державах, які безпосередньо не зазнали впливу війни, як-от Молдова, Румунія та Польща, просторовий розподіл і інтенсивність нічного світла залишилися сталими, що підтверджує збереження звичного укладу життя. На контрасті цьому видно, що більша частина України

в пітьмі вночі, що свідчить про значні зміни в умовах життя. Так, у вільній частині України численні міста тепер виглядають невидимими в темряві. Тільки близько десятка великих міст, як-от Львів та Хмельницький на заході та Вінниця, Київ і Черкаси в центральній та східній частині України, продовжують демонструвати нічне освітлення в центрі міста. Значні міські агломерації на сході України, як-от Харків, Дніпро, Запоріжжя та Миколаїв, практично згасли [12].

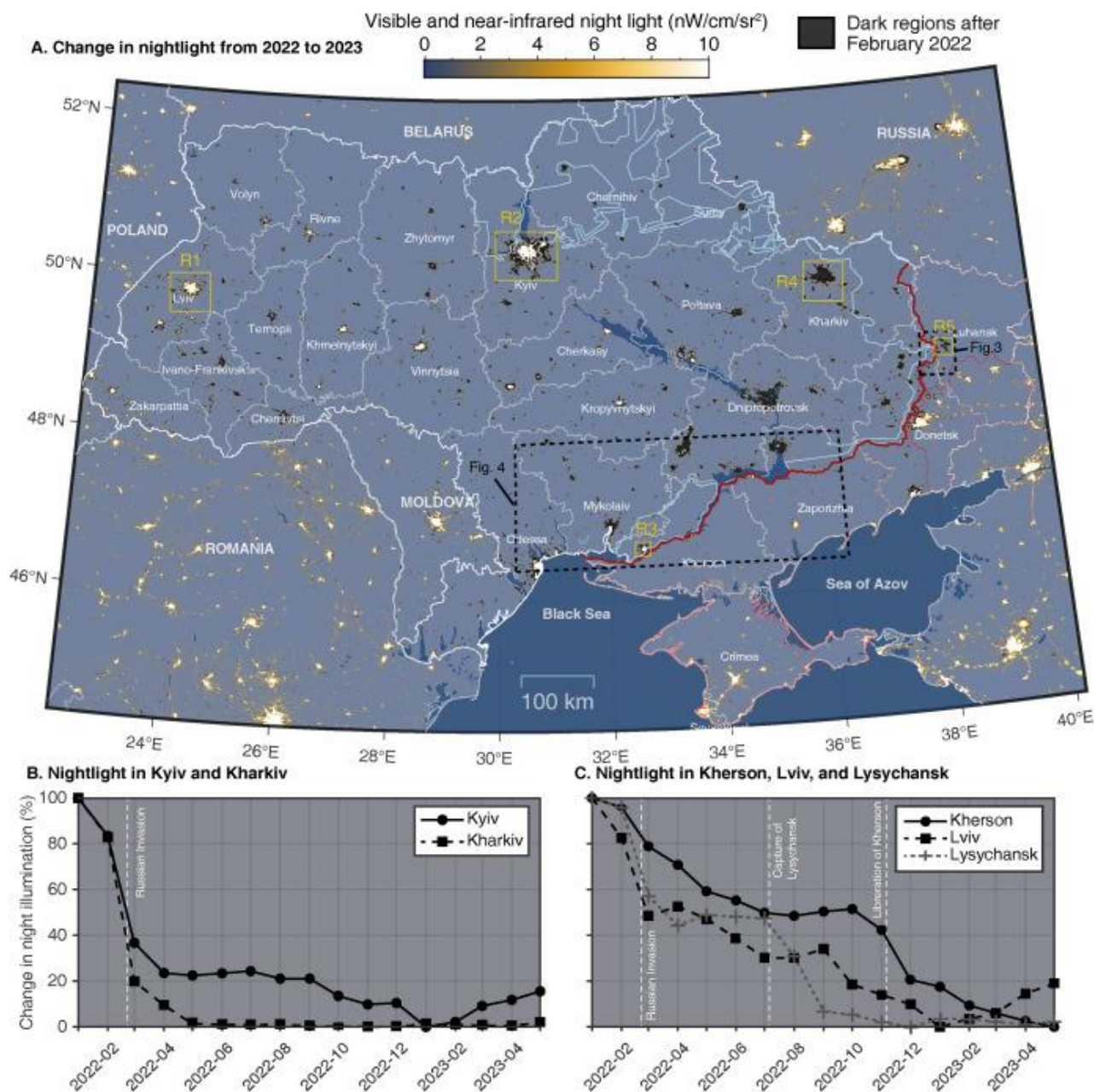


Рисунок 2.2. – Зміна нічного освітлення, виявлена в ближньому інфрачервоному та видимому діапазонах хвиль за допомогою комплексу радіометрів видимого інфрачервоного зображення (VIIRS) над Україною та сусідніми країнами з січня 2022 року по січень 2023 року.

На рис. 2.2 датчик штучного супутника Землі є здебільшого чутливим до штучного освітлення у великих агломераціях. Регіони, що потемніли після російського вторгнення, замасковані чорним кольором. Зменшення нічного освітлення над більшістю вільних українських територій свідчить про значну зміну в діяльності людини. Це пояснює низка факторів, в тому числі правила затемнення, які є реакцією на часті обстріли цивільних об'єктів російськими ракетами дальньої дії, комендантську годину, що обмежує рух авто в нічний час, а також виїзд значної частини населення до безпечніших країн з початком війни.

Варто відзначити, що окуповані території України не дотримуються цієї ж тенденції. Луганськ, Донецьк, Мелітополь, Сімферополь та Севастополь у Криму демонструють безперервне нічне освітлення. Більше того, Крим продовжує намагатися стати туристичним центром для Росії, майже ігноруючи трагедію, що розгортається неподалік. Цей контраст у поведінці підкреслює різницю у веденні бойових дій російською та українською арміями, де російська армія не цурається не законних обстрілів цивільної інфраструктури на окупованих територіях.

Нічне освітлення відображає різні зміни у людській активності по всій Україні. Наприклад, Київ та Харків зазнали тривалого відключення електроенергії невдовзі після російського вторгнення, у той час, як Львів зазнав серії поступових знеструмлень через регулярні обстріли російськими військами його енергетичної інфраструктури. Друге суттєве знеструмлення у Лисичанську співпало із захопленням міста російськими силами. З іншого боку, друге зниження інтенсивності освітлення у Херсоні корелює з його звільненням українськими військами 9 листопада 2022 року.

Карти когерентності пошуково-рятувальних операцій демонструють поступове руйнування Рубіжного в період з 24 квітня по 18 травня 2022 року. Пошкодження міської інфраструктури в Сєверодонецьку стають значними під час пошуково-рятувальних операцій 30 травня 2022 року, наростаючи до 23 червня 2022 року. Більш нерегулярні руйнування Лисичанська спостерігаються за річкою Сіверський Донець, зокрема, знищено місцевий університет та

офіційні будівлі в центрі міста. Ці спостереження загалом відповідають даним OSINT.

Битва за Рубіжне розпочалася 15 березня 2022 року та завершилася 12 травня 2022 року. Бої за Сєвєродонецьк тривали з 6 травня по 24 червня 2022 року, коли українські війська отримали наказ відійти з міста. Битва за Лисичанськ розпочалася 25 червня 2022 року та закінчилася перемогою Росії 2 липня 2022 року. Менш масштабні руйнування Лисичанська пояснюються швидким оточенням міста з півдня, а не затяжними фронтальними атаками.

Однак, дані OSINT дещо відстають від даних пошуково-рятувальних операцій. Відповідно до OSINT, просування російської армії виглядало стабільним з травня по червень 2022 року, з окупацією лише частини Сєвєродонецька. На противагу цьому, дані пошуково-рятувальних операцій фіксують безперервне руйнування Лисичанська протягом того ж періоду, що вказує на те, що бої вже охопили Лисичанськ у червні. Отже, дані дистанційного зондування можуть надати додаткову інформацію, релевантну для оцінки ситуації на полі бою (рис. 2.3) [13].

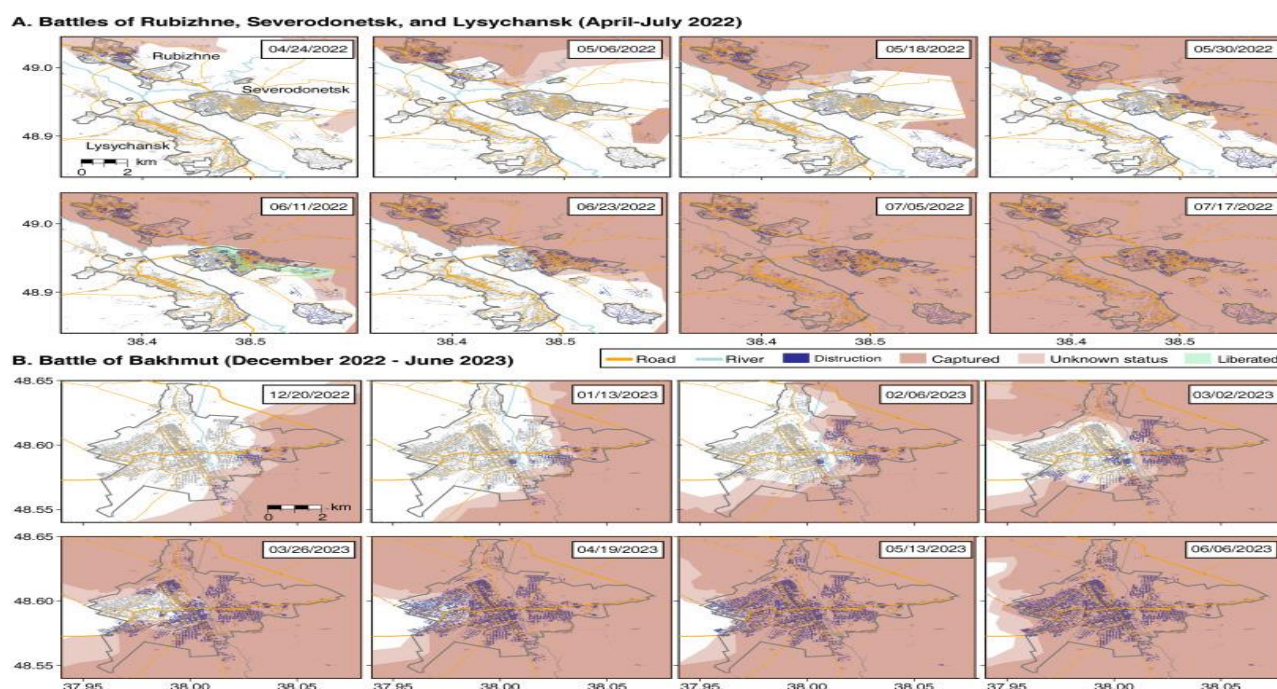


Рисунок 2.3. – Зруйнування міст в ході боїв за Рубіжне, Сєвєродонецьк і Лисичанськ (травень-червень 2022 року), а також за Бахмут (2022-2023 рр.) з огляду на зміни когерентності SAR.

Згідно рис. 2.3 червоні пікселі свідчать про знижену когерентність, що нижче показників знімків, зроблених до початку війни, що вказує на знищення або пошкодження будівель. Усі зміни базуються на значеннях, одержаних з SAR станом на 12.04.2022 року. Лисичанськ було захоплено після оточення з півдня.

В боях за Бахмут усі зміни пов'язані з показниками, отриманими за допомогою SAR від 26.11.2022 року. Міська забудова позначена сірим, а руйнування – темно-червоним кольором. Дані про просування російських сил, спірні території та звільнені зони з OSINT відображені світло-червоним, світлішим червоним та зеленим кольорами відповідно.

2.2. Аналіз стану галузі сільського господарства під час війни

Станом на 2022 рік, розораність земель України перевищувала 56,8% території держави, що ставить Україну на третє місце у світі за цим показником. Це суттєво впливає на екологічну ситуацію в країні, особливо з огляду на антропогенний тиск за останні десятиліття. Недостатній контроль за землекористуванням також сприяє погіршенню стану довкілля, адже деякі фермери використовують практики, що шкодять природі і заборонені українським законодавством та рекомендаціями щодо ведення сільського господарства. Яскравим прикладом є надмірне вирощування соняшнику, частіше одного разу на сім років в одній сівозміні, що призводить до виснаження ґрунтів та опустелювання. Зміни в землекористуванні загалом заслуговують на особливу увагу з екологічної точки зору.

Найбільш руйнівною зміною стало повномасштабне вторгнення, з його наслідками – пошкодженням територій, забрудненням ґрунтів, мінуванням, занедбанням та тимчасовою окупацією.

На сьогодні лише дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволяють адекватно оцінювати ситуацію, оскільки збір інформації на окупованих територіях неможливий. Використовуючи супутникові дані, оцінено скорочення виробництва озимих культур на 4,84 мільйона тон у період 2024-2025 рр.

Розрахунки, виконані різними методами, класичним і супутниковим, суттєво відрізняються. Дані, що використовуються, дозволяють деталізувати вплив зовнішніх факторів на рівні окремих громад та фермерських господарств, навіть на тих територіях, де отримання будь-якої статистичної інформації не можливе. Такий підхід забезпечує точніші прогнози та можливість їхньої перевірки, що не можливо при використанні традиційних методів аналізу даних [16].

Аналізуючи структуру втрат та їх причини, варто зазначити, що лише не значна частина втрат пов'язана з прямим пошкодженням полів внаслідок військових дій. Значний вплив припадає на дрібні господарства, які не змогли ані зібрати врожай, ані провести посівну кампанію літніх культур, придбати добрива, або отримати доступ до ринків збуту. Це, своєю чергою, спонукало до створення інвестиційних грантів та залучення інвестицій від донорських організацій на початку війни, спрямованих саме на підтримку малих фермерських господарств.

Дослідження, проведені на основі даних за 2022 рік, також показали, що господарства з великими земельними площами виявилися краще підготовленими до не прямих наслідків війни. Великі господарства, зазвичай, мають географічну диверсифікацію та доступ до міжнародних джерел фінансування, втрачають у виробництві менше, ніж дрібні фермери.

Дрібні фермерські господарства втратили в середньому близько 0,4 тонни врожаю з гектара, середні господарства – 0,31 тонни з гектара, а найбільші – лише 0,22 тон з гектара. Це підкреслює важливу роль масштабу діяльності та диверсифікації у забезпеченні стійкості сільського господарства до зовнішніх шоків. Ці дані також були перевірені за допомогою супутникових даних. Регресійні моделі, побудовані на основі супутникових даних, підтвердили різницю у втратах урожайності між малими та великими господарствами. Ці висновки є надзвичайно важливими для розробки стратегій підтримки аграрного сектору. Деталізовані дані, отримані за допомогою супутникового моніторингу, допомагають чіткіше визначати пріоритети програм економічної підтримки

сільськогосподарських підприємств, ідентифікувати цільові групи та проводити обґрунтовані оцінки глобальної продовольчої безпеки [1].

Стійкість українських сільськогосподарських підприємств – це ключовий фактор, що пом'якшує вплив війни на світовий ринок продовольства, враховуючи значну роль українського сільського господарства у глобальній продовольчій безпеці. Аналізи глобальних економічних систем показують, що війна підняла ціни на пшеницю у світі приблизно на 2%, в той час як в Україні ціни впали на 27%. Економічні моделі також прогнозують, що у випадках, коли збір врожаю в Україні буде під великим ризиком, то зростання цін на пшеницю може сягнути 50%, а купівельна спроможність у світі може знизитися на понад 30%.

Війна в Україні також ставить надзвичайно актуальні питання щодо планування землекористування. Точні дані про землекористування є критично важливими для оцінки втрат в сільському господарстві, зменшення врожайності, впливу мінування та хімічного забруднення ґрунтів. Ці дані відіграють ключову роль у прогнозуванні виробництва продовольства та гарантуванні глобальної продовольчої безпеки, особливо для країн, залежних від українського експорту.

Однією з найсуттєвіших змін у використанні земель, спричинених війною, є зменшення площі орних земель. Карти землекористування демонструють, що з 2016 року через деградацію земель внаслідок порушення біотехнологічних процесів Україна щорічно втрачала близько 1000 гектарів орної землі. Станом на 2021 рік, загальна площа орних земель в Україні стабілізувалася на позначці 30,7 мільйона гектарів (29,1 мільйона на не окупованих територіях). Після повномасштабного вторгнення у лютому 2022 року площа орних земель зменшилась на 10% по всій країні, а на не окупованих територіях втрати перевищили 22%.

Найбільше постраждали південні та східні регіони України, зокрема Запорізька, Херсонська та Донецька області, де відбулося суттєве скорочення орних земель. Наприклад, у Запорізькій області площа орних земель зменшилась на 39,5%, а в Херсонській – на 43,6% між 2021 і 2024 роками. У 2022 році площа

не оброблених земель становила 4,2 млн га, а до 2024 року вона зросла до 8,7 млн га, що відображає наслідки війни.

Рослинність територій, де агровиробництво припиняється через військові дії, починає спонтанно відновлюватися у короткий термін. Вже за декілька тижнів після припинення обробки сільськогосподарські поля заростають переважно агресивними інвазійними видами рослин. Ці процеси також відбуваються на пошкоджених полях, де невеликі кратери можуть заростати рослинністю та зазнавати деформацій через ерозію, що ускладнює їх виявлення та розмінування. Великі кратери можуть залишатися на полях роками, або навіть десятиліттями. Прикладом є сільськогосподарські угіддя в Україні та Польщі, де ділянки з великими кратерами часів Другої світової війни досі не засіяні через постійне скупчення води в глибоких вирвах [18].

Заростання сотень тисяч гектарів рослинами, боротьба з якими завжди була однією з найскладніших проблем для агровиробників – це новий виклик для України. Досвіду боротьби з інвазійними видами на таких великих площах в історії ще не було. Також варто враховувати, що серед інвазійних видів значну частку складають дерева, масове поширення яких, окрім біологічних ускладнень, призведе до суттєвого погіршення умов розмінування, оскільки території за кілька років покриються чагарниками та молодими деревами, і стануть важкодоступними для техніки та фахівців.

Важливим фактором у післявоєнній зміні землекористування є знищення української сільськогосподарської інфраструктури, зокрема іригаційних систем, що потребуватиме значних інвестицій та часу для відновлення та будівництва або зміни землекористування. Найбільш ураженими регіонами з точки зору залежності від зрошення та руйнування іригаційної інфраструктури є південні області України. Ці області мають більш посушливий та жаркий клімат з високим ризиком посухи та теплового стресу для рослин. Наприклад, руйнування Каховської греблі створює серйозну загрозу для сільського господарства в Херсонській, Запорізькій областях та АР Крим, де історично існує дефіцит водних ресурсів.

Вчені поки що не розробили достатньо точних методів оцінки прямих пошкоджень сільськогосподарських земель, завданих війною. Прямі фізичні пошкодження визначаються, як знищення, або деградація врожаїв та ґрунтів, безпосередньо спричинені військовими діями. Дослідження, в яких використовується ДЗЗ для виявлення пошкоджень сільськогосподарських полів під час активних бойових дій, коли не можливо провести польові дослідження і взяти проби ґрунту, часто обмежуються малими територіями і вимагають зображень з високою роздільною здатністю, що ускладнює їх використання для великих площ. Крім того, аналіз аерофотознімків та супутникових даних з високою деталізацією обмежений доступністю таких зображень, особливо в режимі реального часу. Водночас, враховуючи регулярне оновлення даних та широке покриття, найбільш перспективним джерелом для таких досліджень є відкриті дані Європейського космічного агентства, зокрема отримані з місій Sentinel-1 та Sentinel-2 [1].

На їх основі розроблено алгоритм для автоматичного виявлення та моніторингу пошкоджених полів, що дозволяє досягти високої деталізації за допомогою методів штучного інтелекту. Використовуючи спектральні діапазони з роздільною здатністю 10 метрів, індекси вегетації та їх статистичні характеристики у часових рядах, вдалося досягти точності близько 85% у визначенні пошкоджених ділянок.

Модель здатна ідентифікувати різні типи пошкоджень, включаючи обстріляні поля, поля, які зазнали пожежі, та ділянки, пошкоджені окопами чи рухом військової техніки.

За допомогою супутникової інформації, враховуючи дату отримання даних та інформацію про культури, вирощені на полях до пошкодження, виявлено приблизно 743,5 тисячі гектарів сільгоспугідь, які зазнали шкоди у 2022 році. Дослідження охоплювало десять областей України. У 2023 році додатково було виявлено 801 тисячу гектарів пошкоджених площ, а станом на серпень 2024 року – ще 366 тисяч гектарів. Отже, загалом, з початку війни було пошкоджено близько 1,91 мільйона гектарів сільськогосподарських угідь, згідно з оцінками.

Встановлено, що найбільші збитки сільгоспземлям були завдані навесні та влітку, зокрема, у період з березня по вересень, що співпадає з періодами активних бойових дій. Варто відзначити, що якщо у 2022-2023 роках пошкодження переважно були наслідком обстрілів, то у 2024 році на полях спостерігаються сліди окопів та пожеж (рис. 2.4).

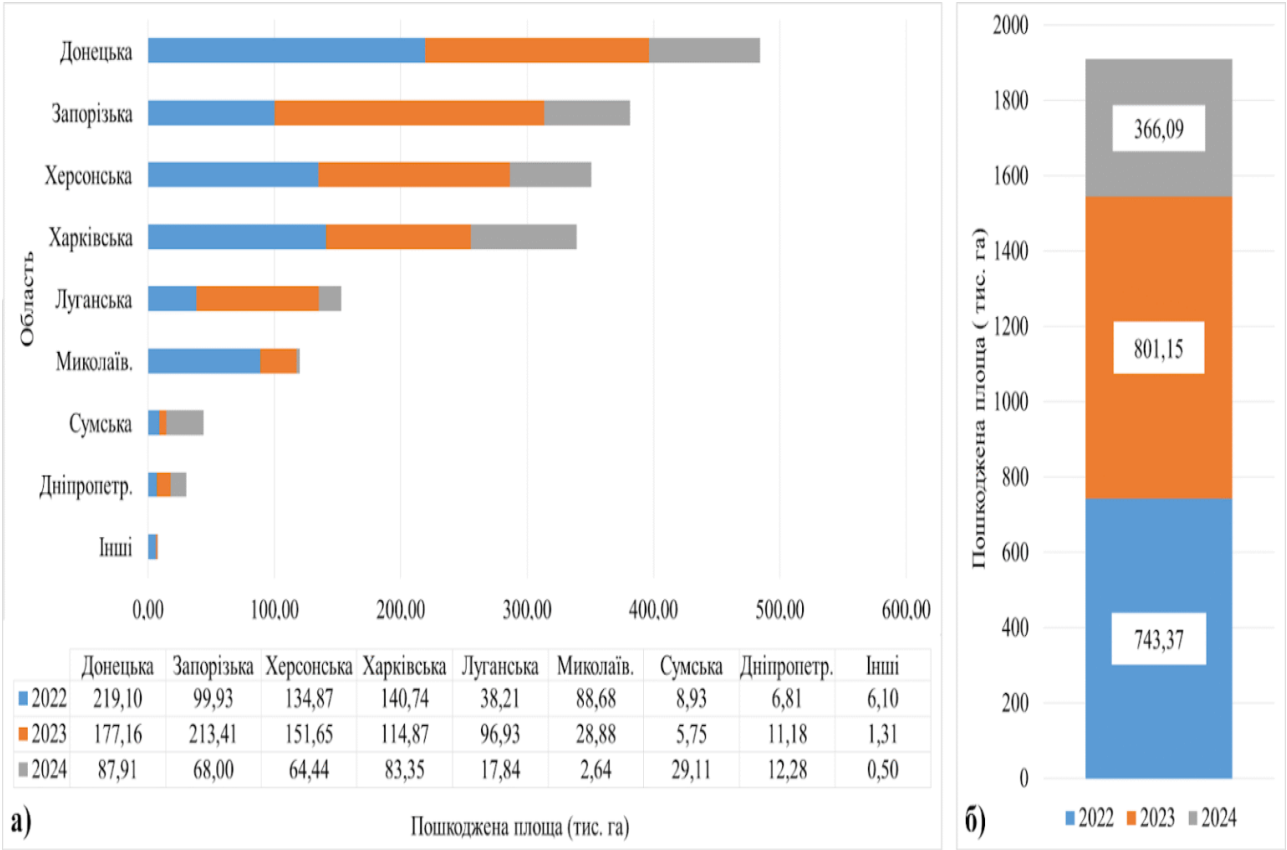


Рисунок 2.4. – Площа пошкоджених полів за період березень 2022-серпень 2024 року а) розподіл за регіонами, б) розподіл за роками.

Аналізуючи регіональний розріз, найбільше збитків зазнали сільгоспугіддя Донецької області: за три роки повномасштабного вторгнення тут пошкоджено приблизно 484.1 тис га, що перевищує чверть (25%) загальної площі постраждалих земель. Далі йде Запорізька область, де зафіксовано близько 381 тис га пошкоджених земель (20%). Херсонщина та Харківщина зазнали втрат, які складають, відповідно, 351 тис га (18.4%) та 339 тис га (17.7%) (рис. 2.5).

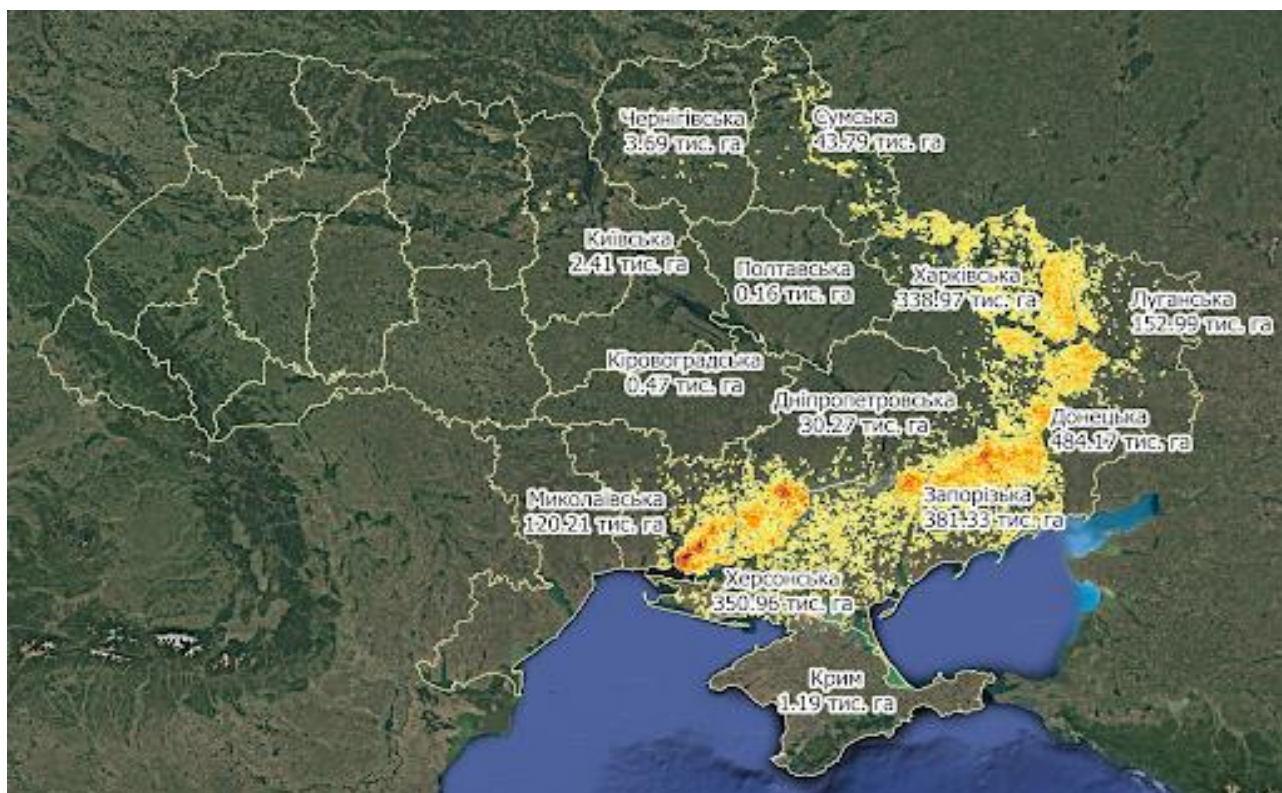


Рисунок 2.5. – Карта пошкоджених полів за період березень 2022-серпень 2024 року.

Для відслідковування пошкоджених угідь функціонує геопортал під назвою “WarScan” в хмарному середовищі Google Earth Engine (GEE) та містить: векторні контури пошкоджених полів, растрові маски з інформацією про локальні ушкодження, дати пошкоджень, площі уражень та ступінь пошкодження кожного поля. Крім того, він дозволяє безпосередньо переглядати супутникові знімки, де виявлено пошкодження. У майбутньому планується розширення функціоналу, а саме додавання даних про тип пошкоджень, а також впровадження можливості завантаження даних та автоматичного оновлення інформації [23].

Дана методика дозволяє оновлювати інформацію про пошкодження, не зважаючи на наявність хмарності чи зміни в рослинності, що робить її дуже ефективною для автоматизованого супутникового моніторингу впливу військових дій на сільське господарство. Отримані дані корисні для оцінки відновлення, стратегічного планування та фіксації воєнних злочинів, пов’язаних

з нищенням аграрних ресурсів. Оперативні оцінки втрат відіграють ключову роль у кількісній оцінці збитків урожаю, а також для ухвалення рішень щодо продовольчого експорту та ціноутворення.

2.3. Супутниковий моніторинг екологічних наслідків війни для сільського господарства

Війна в Україні спричинила значні екологічні проблеми для сільськогосподарських земель, що потребує перегляду підходів до їх використання та відновлення.

Відомо, що вирви від вибухів зберігаються на полях роками, а природні процеси не можуть швидко відновити ландшафт. Відтак, й досі є території в Європі, де видно кратери від першої та другої світових війн, та навіть на оброблюваних полях можуть залишитися сліди. Такі пошкоджені ділянки потребують рекультивації, щоб їх можна було ефективно використовувати в сільському господарстві.

Відновлення постраждалих земель залежить від рівня їх деградації, забруднення та політичної ситуації. За підрахунками, лише близько третини пошкоджених полів повертаються до обробітку, в той час як дві третини залишаються занедбаними. На покинутих ділянках спочатку з'являються бур'яни, наприклад, будяки, полин, або лобода, які допомагають стабілізувати ґрунт. З часом ці землі можуть трансформуватися в напів природні луки, або зарості чагарників, що унеможлиблює їхнє повернення в традиційне сільське господарство.

Ерозія ґрунтів – це один з найсерйозніших наслідків військових дій. Кратери від вибухів створюють не рівності на поверхні, які сприяють ерозії. Зливові води та вітри швидше змивають верхні, родючі шари ґрунту, а ущільнення ґрунту важкою технікою (танки, артилерійські тягачі) ще більше поглиблює проблему. Рух військової техніки порушує структуру ґрунту, стискаючи його до стану, коли вода та коріння рослин не можуть проникнути в

глибину. Це призводить до застою води та виснаження ґрунту. Такі ділянки потребують значних зусиль для відновлення родючості, зокрема глибокої оранки та внесення добрив.

Крім фізичного пошкодження, військові дії спричиняють хімічне забруднення земель. У ґрунтах накопичуються важкі метали (стронцій, мідь, цинк, нікель і хром), що призводить до окиснення ґрунтів та формування токсичних органічних сполук. Це ускладнює вирощування сільськогосподарських культур та сприяє поширенню стійких до забруднення рослин. Хоча менш вибагливі культури (злакові, цукровий буряк, картопля) можуть рости на таких землях, однак слід пам'ятати, що вживання врожаю із забруднених територій становить загрозу для здоров'я людей і тварин.

Тривале не використання полів створює, як виклики, так і нові можливості. З одного боку, не оброблені поля піддаються ерозії, заростають бур'янами та втрачають сільськогосподарську функцію. З іншого боку, такі землі можна використати для інших, в тому числі екологічних, проектів. Наприклад, переведення пошкоджених земель у пасовища зменшить розораність та навантаження на екосистеми, сприяючи збереженню ґрунтів, зниженню ерозії та покращенню водного балансу. У світі вже практикується заліснення та відновлення природних зон за рахунок зменшення площ сільськогосподарських угідь. Висадження лісу на деградованих землях допоможе знизити ризики ерозії, поліпшити якість водних ресурсів та навіть створити нове середовище для дикої фауни [1].

Іншим варіантом є вирощування енергетичних культур, які не тільки стануть джерелом відновлюваної енергії, а й допоможуть очистити ґрунт. Водночас, не має згоди стосовно безпеки використання енергетичної верби, вирощеної на забруднених токсичними речовинами територіях, та безпечності її використання для довкілля і здоров'я. Додатковою проблемою є утилізація залишків після спалювання таких рослин, які можуть містити важкі метали.

Війна змусила переосмислити підходи до землекористування в Україні. Пошкоджені, або занедбані землі можуть стати основою для нових стратегій від

консервації та органічного землеробства до створення заповідників чи використання під енергетичні культури. Хоча це може знизити аграрний потенціал у короткостроковій перспективі, такі зміни здатні стабілізувати екосистеми та створити умови для сталого розвитку.

Супутниковий моніторинг є незамінним інструментом у дослідженні наслідків війни для сільського господарства та довкілля, оскільки забезпечує об'єктивну та масштабну оцінку ситуації там, де традиційні методи збору інформації не можливі, або значно обмежені. На окупованих територіях, у зонах активних бойових дій чи замінованих районах доступ до польових спостережень, наземних вимірювань, або аерофотознімків є не безпечним або технічно не можливим. Лише супутникові дані дають змогу отримувати регулярну, актуальну та точну інформацію про стан сільськогосподарських земель.

Аналіз даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дає змогу не лише зафіксувати загальне скорочення площі орних земель, а й виявити специфічні типи пошкоджень. Наприклад, оптичні знімки Sentinel-2 дозволяють ідентифікувати сліди пожеж, вибухів чи окопів, а радарні дані Sentinel-1 – виявляти зміни структури ґрунту навіть за наявності хмарності, або вночі. Це важливо для оцінки довго строківих екологічних наслідків. Супутникові спостереження фіксують зростання рівня ерозії, ущільнення ґрунту важкою технікою чи забруднення земель токсичними речовинами, які без спеціального обладнання виявити складно.

Окрім цього, супутникові дані дозволяють оцінити не лише пошкодження, а й швидкість відновлення сільського господарства. За допомогою аналізу вегетаційних індексів можна відстежувати, чи повертаються землі до обробітку, які культури висаджуються після руйнувань, а також визначити регіони, де агровиробництво залишається не можливим. Спостереження в режимі реального часу дозволяють оцінювати адаптацію сільського господарства до нових умов, темпи відновлення сільськогосподарських підприємств та визначити регіони, які потребують першочергової підтримки [22].

Таким чином, супутниковий моніторинг – це незамінний інструмент у воєнний час, оскільки забезпечує об’єктивну оцінку впливу війни на сільське господарство, дозволяє контролювати екологічні ризики та допомагає ефективно планувати процеси відновлення, навіть за відсутності доступу до традиційних джерел інформації.

3. ОЦІНКА ВПЛИВУ ВОЄННИХ ДІЙ НА ЗЕМЛІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

3.1. Результати супутникового моніторингу для пошкоджених сільськогосподарських угідь

У контексті збройного конфлікту, що розгортається на території України, надзвичайно актуальним є супутниковий моніторинг стану сільськогосподарських угідь. Систематичне дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє ефективно виявляти та оцінювати ступінь пошкоджень агроландшафтів, спричинених бойовими діями, навіть на великих територіях та у важко доступних районах.

Методика оцінювання пошкоджених сільськогосподарських територій базується на аналізі супутникових зображень із використанням спеціалізованих геоінформаційних платформ, наприклад, сервісу WarScan, який функціонує на базі інструментів Google Earth Engine. Цей інструмент використовує дані з супутників Sentinel-2, що мають високу спектральну та просторову роздільну здатність, що дозволяє з високою точністю визначати аномалії в рослинному покриві.

Алгоритм виявлення бойових пошкоджень передбачає розрахунок вегетаційних індексів, наприклад, NDVI, порівняння показників для різних часових періодів, а також виявлення різких змін у структурі покриву. Зменшення індексу NDVI, наявність локальних зон без рослинності, або ознак горіння свідчать про можливі обстріли, пожежі чи інші форми руйнування. Крім того, алгоритми враховують сезонність сільськогосподарських робіт, щоб мінімізувати ймовірність помилкової інтерпретації природних змін (збирання врожаю, оранка, сівба тощо, як бойових ушкоджень).

Платформа автоматично генерує карти з візуалізацією рівнів пошкодження в межах конкретних полів, класифікуючи їх за шкалою від <5% до >40%.

Пошкодження класифікуються, як обстріляні, або згорілі, що дозволяє точніше формувати звіти про характер і площу ураження. Наприклад, у Харківській області станом на 30 серпня 2024 року було зафіксовано два пошкоджених поля із сумарною площею ураження 298,361 га, зокрема, як результат обстрілів та пожеж. Аналогічний аналіз було проведено для територій Дніпропетровської області [23].

Отримані дані є важливими, як для оцінки прямих економічних збитків аграрним підприємствам, так і для формування рекомендацій щодо подальшого відновлення земель, планування посівів та обґрунтування необхідності компенсацій. Використання ДЗЗ у таких цілях дозволяє здійснювати моніторинг у режимі близькому до реального часу, що має критичне значення в умовах війни.

Таким чином, дистанційне зондування Землі виступає не від'ємним інструментом в системі аграрного моніторингу та відновлення, забезпечуючи об'єктивність, оперативність та просторову деталізацію оцінки бойових пошкоджень.

Онлайн-платформа WarScan, яка розроблена на базі Google Earth Engine, проводить автоматизований супутниковий моніторинг стану полів України, зокрема, визначаючи зони, де ймовірно відбулися ушкодження посівів внаслідок обстрілів або дій, пов'язаних з війною. Моніторинг ґрунтується на аналізі змін спектральних індексів рослинності (NDVI, EVI тощо) за даними супутників Sentinel-2 та інших джерел оптичного дистанційного зондування. Система також враховує локальні аномалії, які суттєво відрізняються від типових сезонних змін рослинного покриву, що дає змогу ідентифікувати не лише природні, але й техногенні або військові пошкодження.

На рисунку 3.1 продемонстровано приклад такого аналізу для одного з полів на території Дніпропетровської області, станом на 23 серпня 2024 року. Площа пошкодженого поля становить 105,396 га, при цьому система розрізняє причини пошкоджень на дві основні категорії – згорілі (червоним) та пошкоджені внаслідок обстрілів (синім). Рівень пошкодження представлено у

відсотках згідно з кольоровою шкалою легенди. На мапі також виділено локальні ділянки з ушкодженням понад 40% (темно-червоний колір).

Карта дозволяє візуалізувати просторову структуру пошкоджень, оцінити масштаби втрат агровиробництва, а також застосовувати ці дані для подальшого аналізу деградації ґрунтів, втрати врожаїв та планування заходів з відновлення агроландшафтів [1].

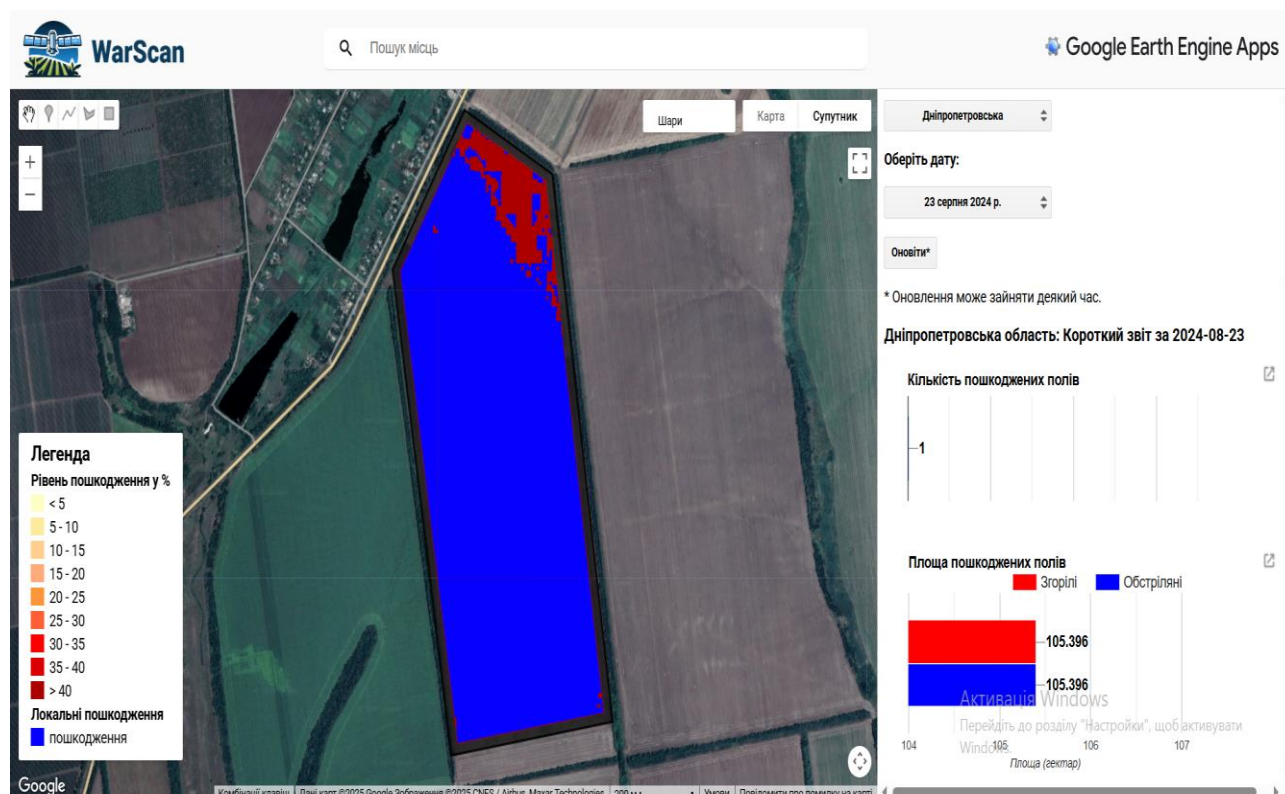


Рисунок 3.1 – Аналіз поля на території Дніпропетровської області за допомогою платформи WarScan станом на 23 серпня 2024 року.

На рис. 3.2 показано результати автоматизованого аналізу для двох полів у Харківській області на 30 серпня 2024 року. Система виявила ушкодження загальною площею 298,361 га. Види ушкоджень класифіковано, як спалені (позначені червоним) та обстріляні (виділені синім). Ступінь пошкоджень показано у відсотках, відповідно до легенди (від <5% до >40%), що дозволяє оцінити інтенсивність деградації земель. Отримані дані дозволяють точно встановити місце розташування пошкоджених територій, оцінити втрати врожаю, а також створити аналітичну базу для подальшої оцінки збитків та

планування відновлення агровиробництва на деокупованих, або прифронтових землях.

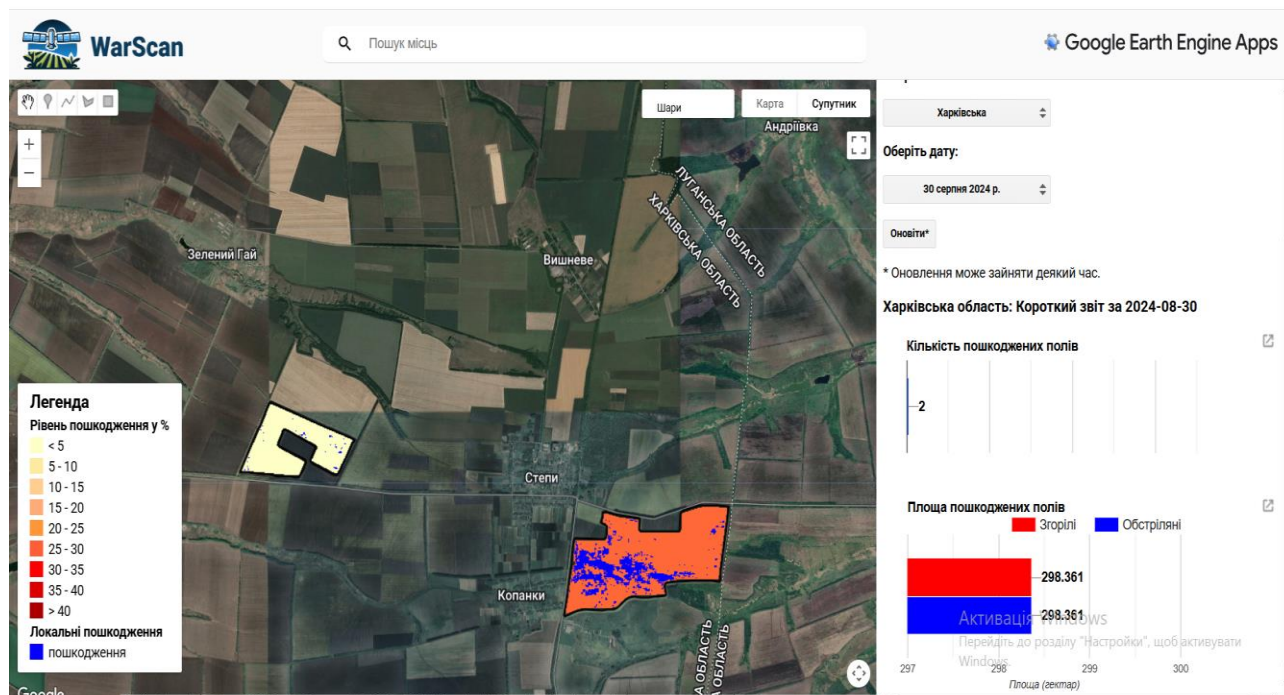


Рисунок 3.2 – Аналіз полів на території Харківській області за допомогою платформи WarScan на 30 серпня 2024 року.

Моніторинг здійснюється за допомогою аналізу мульти спектральних зображень, особливо в інфрачервоному та червоному діапазонах, чутливих до змін у рослинному покриві. Сервіс WarScan використовує алгоритми обробки зображень для виявлення аномальних ділянок, зумовлених вигорянням рослинності, зміною структури ґрунту, або іншими ушкодженнями. На кожному знімку відображено ділянки з різним рівнем пошкодження, вираженим у відсотках. Для візуалізації використовується кольорова шкала: від жовтого (<5%) до темно-червоного (>40%). Також виділяються ділянки локальних пошкоджень, що можуть бути пов'язані з вирвами від снарядів, або мін.

Наприклад, для Дніпропетровської області (рис. 3.1) було виявлено одне поле з високим рівнем пошкодження. Значна частина території зазнала обстрілів, про що свідчать червоні зони на зображенні. У Харківській області (рис. 3.2) ідентифіковано, як мінімум два поля з інтенсивними локальними пошкодженнями. Перша ділянка показує наявність великої площі згорілих

сільськогосподарських угідь (298.361 га), а друга – суцільне затемнення в межах поля, що може свідчити про деградацію вегетаційного покриву (рис. 3.3).

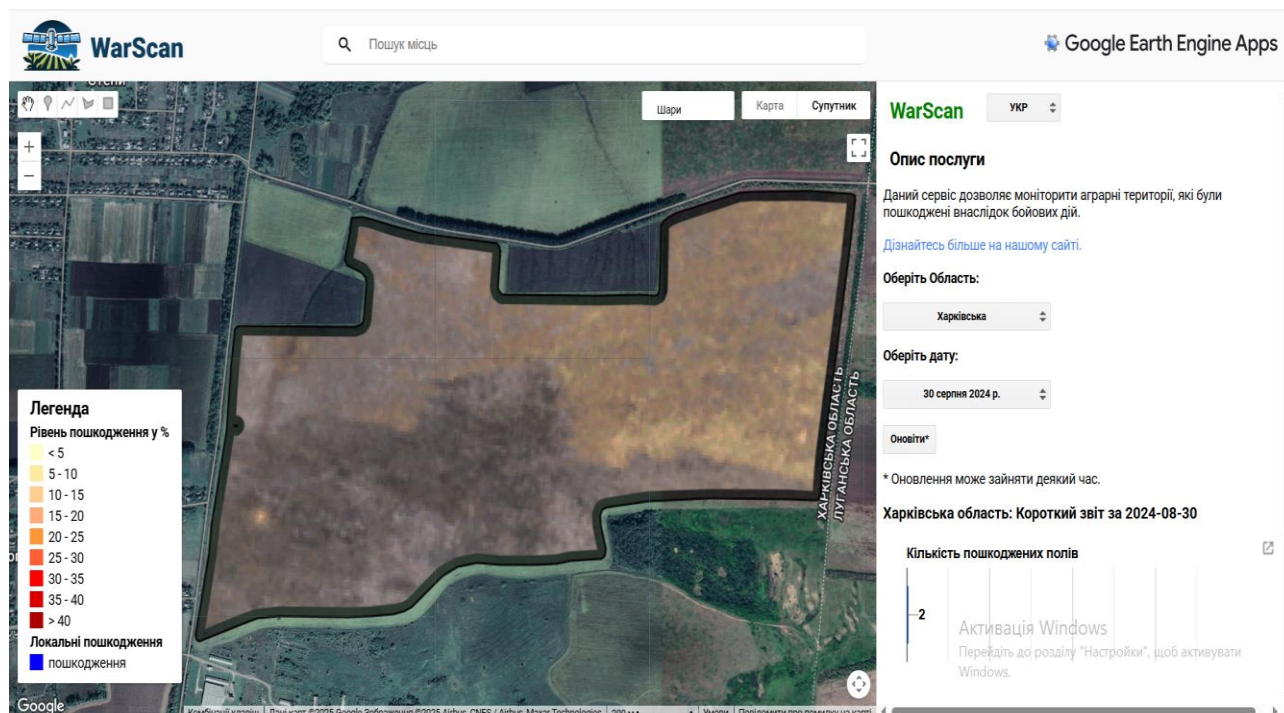


Рисунок 3.3 – Аналіз поля згідно вегетаційного індексу на території Харківській області за допомогою платформи WarScan на 30 серпня 2024 року.

Інформація, отримана за допомогою WarScan, є надзвичайно важливою для оперативної оцінки стану земель, планування відновлювальних робіт та підготовки звітів про нанесену шкоду в рамках відповідних державних та міжнародних програм [23].

3.2. Виявлення пошкоджень сільськогосподарських угідь за даними супутникових знімків Sentinel-2

Алгоритм автоматичного виявлення сільськогосподарських полів, пошкоджених внаслідок воєнних дій, та ідентифікації пошкоджених ділянок визначає прямі пошкодження на полях, як аномалії на супутникових знімках Sentinel-2. Відповідний алгоритм структуровано у три основні кроки (рис. 3.4):

1) вручну здійснюють аналіз пошкоджених ділянок для формування навчальних і тестових наборів даних;

2) застосовують модель машинного навчання, зокрема, класифікатор випадкового лісу (RF), для ідентифікації пошкоджених полів;

3) для додаткової ідентифікації пошкоджених ділянок на цих полях використовується порогова сегментація, спрямована на виявлення аномалій.

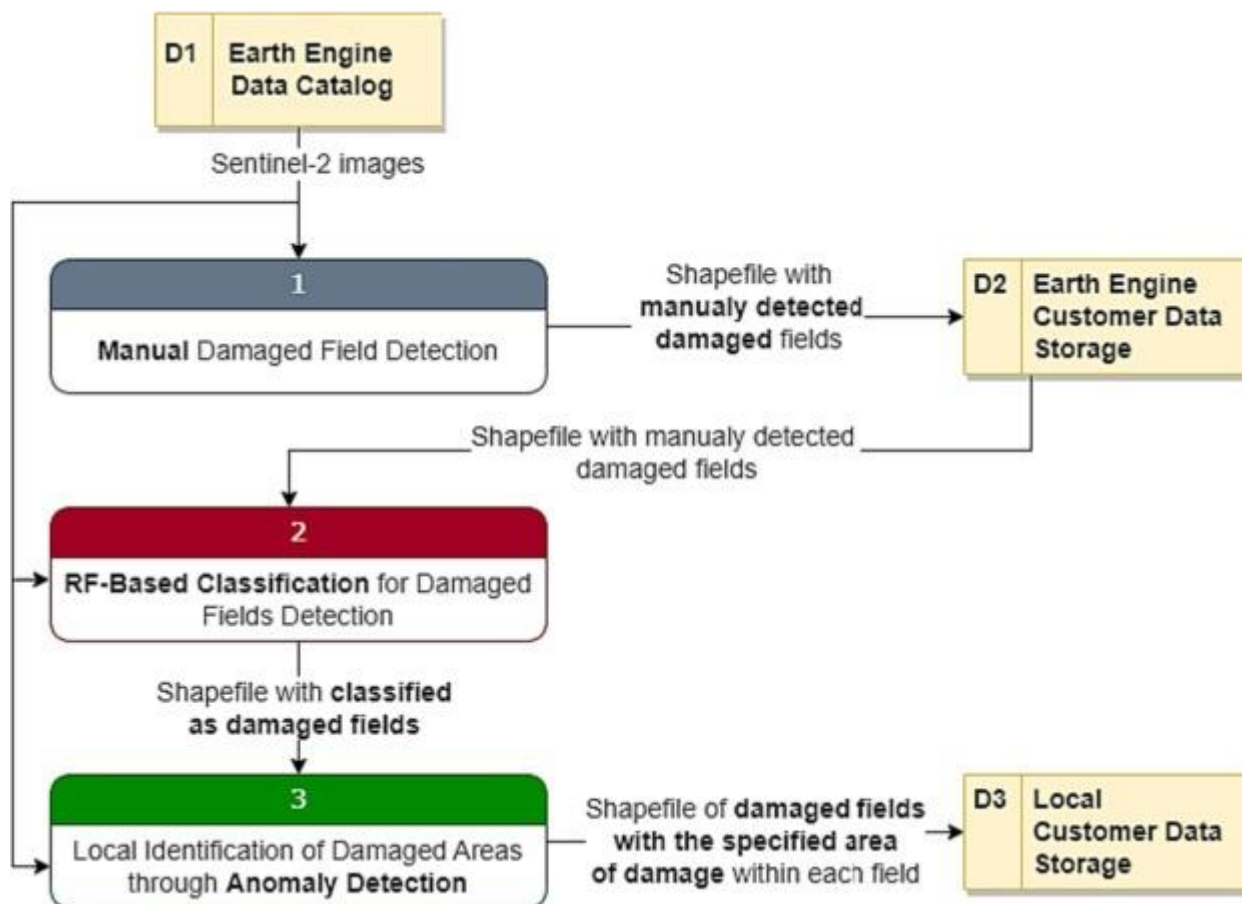


Рисунок 3.4 – Алгоритм автоматичного виявлення сільськогосподарських полів, пошкоджених внаслідок воєнних дій, та ідентифікації пошкоджених ділянок за допомогою супутникових знімків Sentinel-2.

Розглянувши перший крок алгоритму необхідно спочатку виокремити найбільш релевантні дані з супутника Sentinel-2. Це стосується конкретних спектральних діапазонів та їх комбінацій, таких як індекси вегетації рослинності. Визначення найбільш інформативних каналів для виявлення пошкоджень на сільськогосподарських полях проводять за допомогою аналізу індексів рослинності [20].

Відповідно, вибухи та пересування військової техніки спричиняють знищення рослинного покриву на полях, оголюючи ґрунт. На полях без

рослинності верхній шар ґрунту, ймовірно, буде порушений. Глибина цього впливу варіюється залежно від інтенсивності удару та властивостей ґрунту, зокрема, від вмісту органічних речовин у верхньому шарі ґрунту та мінерального складу підґрунтя. На основі цих спостережень спектральні значення уражених пікселів на супутниковому знімку суттєво відрізнятимуться від середніх показників у межах поля. Чим масштабніші пошкодження, тим більшим має бути це відхилення.

В межах дослідження обрано три типи полів (не ушкоджені, помірно та сильно пошкоджені), а також досліджено розподіл піксельних значень у спектральних діапазонах та індексах рослинності до та після події пошкодження. Вибрані поля були засіяні однією культурою, розміщені неподалік одне від одного та мали приблизно однакову площу (рис. 3.5).

Pre-Event: 6 May



Post-Event: 27 June



Рисунок 3.5 – Поля до та після обстрілу.

Смуги Sentinel-2 з роздільною здатністю 10 метрів B2 (синій), B3 (зелений), B4 (червоний) і B8 (ближній інфрачервоний діапазон) демонструють,

що після можливої події пошкодження, показники В2 та В3 зменшилися, як для полів із помірним, так і для тих, що мають значні ушкодження, порівняно з не ушкодженими ділянками. Сильно пошкоджене поле зазнало більш вираженого падіння показників, хоча спочатку мало пікові значення у цих смугах. Для смуги В4 розподіл значень між пошкодженими та не пошкодженими областями не показує значної відмінності. У випадку смуги В8, хоча й спостерігається помітне зменшення значень для пошкоджених полів порівняно з не ушкодженими, різниця між помірно та сильно пошкодженими полями не є суттєвою. Ці коливання у розподілі спектральних смуг є показниками аномалій, зокрема пошкоджень полів, підкреслюючи потенціал використання цих змін для автоматизованого розпізнавання полів із значними пошкодженнями від тих, що не зазнали впливу [18].

3.3. Аналіз та оцінка наслідків бойових дій для земель сільськогосподарського призначення за даними дистанційного зондування Землі

Збройні конфлікти завдають відчутної шкоди земельним ресурсам, особливо тим, що задіяні в аграрному секторі. Внаслідок воєнних дій відбувається фізичне руйнування ґрунтового покриву, забруднення токсичними речовинами, зміна гідрологічного режиму та деградація родючості угідь. Для оперативного та всебічного аналізу цих змін одним із найефективніших інструментів є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), що дає змогу швидко отримувати актуальну просторову інформацію на великі території, зокрема й на ділянки, де перебувати небезпечно.

Методика аналізу та оцінки наслідків бойових дій для сільськогосподарських земель за даними ДЗЗ передбачає такі основні етапи:

1. Визначення пошкоджених угідь – виявлення територій з ознаками руйнувань, кратерів, згорілої, або знищеної рослинності, змін в

структурі орних площ на супутникових знімках високої та надвисокої роздільної здатності.

2. Встановлення факторів впливу – ідентифікація типів бойового впливу (артилерійські та авіаційні обстріли, мінування, рух військової техніки, підпали тощо), що призвели до пошкодження угідь.
3. Визначення типів впливу та наслідків – класифікація змін за характером впливу: фізичні (руйнування структури ґрунту), хімічні (забруднення важкими металами, вибуховими речовинами, паливно-мастильними матеріалами), термічні (вигорання рослинності та шару гумусу), гідрологічні (порушення дренажу та зволоження).
4. Оцінка рівня пошкодження – застосування індексів вегетації (NDVI, EVI) та радарних знімків для кількісного визначення втрат біомаси та продуктивності культур, а також для просторового окреслення площ деградації.
5. Комплексна оцінка придатності земель – об'єднання результатів супутникового аналізу з даними ґрунтових обстежень та лабораторних досліджень для визначення можливості подальшого сільськогосподарського використання територій.
6. Визначення технологій відновлення – підготовка рекомендацій щодо рекультивації, очищення ґрунтів, відновлення родючості та структури агроландшафтів.

ДЗЗ дозволяє не лише фіксувати наслідки в конкретний момент часу, а й проводити ретроспективний аналіз, порівнюючи поточний стан угідь з довоєнними знімками. Це дає змогу кількісно визначати зміни та прогнозувати потенціал відновлення земель [3].

Застосування ДЗЗ у післявоєнному плануванні та відновленні аграрного сектору має наступні важливі переваги:

✓ оперативність через швидке отримання інформації для прийняття управлінських рішень;

- ✓ масштабність, що передбачає охоплення великих територій з мінімальними витратами;
- ✓ точність та можливість інтеграції з наземними вимірами для збільшення достовірності;
- ✓ безпека через відсутність потреби перебування фахівців у потенційно небезпечних районах.

Таким чином, дистанційне зондування Землі є незамінним інструментом в системі моніторингу та оцінки наслідків бойових дій для сільськогосподарських земель, оскільки забезпечує комплексний підхід до їх обстеження, сприяє оптимізації процесів відновлення та ефективному плануванню використання територій у післявоєнний період.

На місцевому рівні мають бути проведені детальні дослідження наслідків бойових дій для ґрунтів із застосуванням комбінації польових методів, лабораторних аналізів ґрунтових зразків, а також методів ДЗЗ. Використання дистанційного зондування Землі в процесі післявоєнної відбудови допоможе ефективно координувати зусилля та гарантувати стійкий та довготривалий розвиток, даючи змогу відстежувати будь-які зміни в динаміці, включаючи ретроспективу. Застосування даних дистанційного зондування у післявоєнний період дозволить:

- оцінити ступінь пошкодження інфраструктури, щоб оперативно та ефективно оцінити масштаби руйнувань;
- здійснювати моніторинг змін в землекористуванні для планування майбутнього сталого розвитку територій;
- відстежувати забруднення довкілля в післявоєнний період, щоби застосувати необхідні заходи для відновлення екологічної системи та здоров'я населення;
- планувати розміщення нових об'єктів інфраструктури, таких як школи, лікарні, аеропорти тощо з урахуванням географічних та екологічних змін;
- координувати надання гуманітарної допомоги для відбудови територій.

4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Державне екологічне регулювання – це система активних законодавчих, адміністративних і економічних заходів і важелів, які використовують державні органи різного рівня для примушення, економічного спонукання і матеріального стимулювання забруднювачів навколишнього середовища до запобігання, обмеження або усунення викидів у природні і техногенні середовища забруднюючих речовин.

Роль методів державного регулювання системи захисту навколишнього середовища є дуже неефективною, і тому необхідний пошук нових взаємоприйнятних форм державного і ринкового регулювання. Як свідчить досвід, у жодній із країн світу держава не може повністю взяти на себе тягар витрат на природоохоронні потреби. Необхідно ще й об'єднання капіталу недержавних структур, яким потрібно працювати на охорону навколишнього середовища.

Обмеженість бюджетних можливостей держави вимагає їх умілого використання для нейтралізації найнебезпечніших для людини і навколишнього середовища ризиків. Необхідно вже сьогодні чітко визначати витрати і вигоди нової екологічної політики, прагнути до повної інтеграції екологічної та економічної політики в усіх галузях народного господарства, залучення екологічних факторів у ринкову систему.

Сьогодні, щоб забезпечити необхідні фінансові ресурси, крім державних субсидій, потрібно задіяти й так звані ринкові фактори (екологічне страхування, регіональні системи управління якістю навколишнього середовища тощо). Тому зараз важливе осмислення досвіду як провідних країн світу, так і колишніх соціалістичних країн у сфері оптимізації державних і ринкових форм регулювання природоохоронної діяльності. Загальним для всіх країн колишньої соціалістичної орієнтації явищем сьогодні є поглиблення економічної і політичної кризи, незалежно від того, в яких би формах вона не проявлялася. Це так чи інакше веде до зміни деяких пріоритетів у екологічній політиці.

Для створення нового механізму охорони навколишнього середовища необхідне вивчення світового досвіду щодо регулювання сучасного виробництва й охорони природи. Аналіз даних процесів у країнах з розвинутою ринковою системою засвідчує, що природокористування відігравало важливу роль у становленні структури господарства цих країн. На перших етапах розвитку природокористування ігнорувалося. Необхідно було врегулювати суперечності між виробництвом, яке розширюється, і екологічними проблемами. Це спонукало створення системи врахування екологічного фактора в процесі господарської практики; ресурсозбереження; включення природокористування в систему державно-монополістичного регулювання економічної діяльності, в тому числі розробку і впровадження природоохоронних стимулів у господарський механізм.

За умов ринкових перетворень сучасна економіка, що характеризується великомасштабними структурними змінами, змушена інтенсивно шукати нові шляхи регулювання взаємовпливу господарської діяльності і навколишнього середовища. Останніми роками дедалі більша кількість підприємців усвідомлює загальну необхідність посилення охорони навколишнього середовища, незважаючи на те, що екологічні заходи є дорогими і потрібні великі інвестиції для їх здійснення.

Необхідність державної участі у розв'язанні екологічних проблем зумовлюється також тим, що вони вже не можуть бути "зняті" в межах окремої країни. Забруднення природного середовища набуває міждержавних, планетарних масштабів. Міжнародні аспекти екологічних проблем можна визначити як конфлікт між глобальним характером екологічної кризи, з одного боку, і відсутністю глобального суспільного механізму регулювання національних екологічних дій, з іншого.

Найважливішим фактором симбіозу державних і ринкових форм екологічного регулювання є вироблення найбільш дієвих форм економічних інструментів, що включають, у свою чергу, або фінансовий трансферт — між забруднювачем і суспільством (податки, платежі, фінансова допомога, кредити

на обмеження викидів тощо), або реальну нову ринкову систему (платні дозволи на викиди, квоти, допуски чи граничні показники рівня забруднюючого викиду для конкретних забруднювачів, які після встановлення владою можуть бути об'єктом купівлі-продажу).

Платні дозволи створюють для забруднювачів стимул до зменшення своїх викидів до рівня, нижчого від встановлених меж, з тим, щоб продавати різницю між реальним і дозволеним викидами іншим забруднювачам, які тим самим отримують право на більший обсяг викиду забруднюючих речовин, ніж було встановлено спочатку.

Сьогодні як для приватного підприємництва, так і для державної структури існують труднощі у визначенні ціни складових навколишнього середовища. Переважає думка, що платежі за забруднення лише дозволяють винуватому в забрудненні купити право забруднювати, тому більш придатним інструментом є пряме регулювання. Навколишнє середовище є об'єктом, здатним витримати певний рівень забруднення, і тому завдання полягає в тому, щоб забезпечити не перевищення цього рівня.

При формуванні загальної стратегії природокористування держава гарантує певний рівень дії економічного механізму забезпечення ресурсозберігаючої оцінки природних ресурсів. Існують два основні підходи до економічної оцінки цих ресурсів. Один із них ґрунтується на теорії трудової вартості, згідно з якою природні ресурси, не будучи продуктом праці, не мають вартості та її грошового вираження — ціни. Інший підхід спирається на можливість визначення ціни на природні ресурси на основі теорії диференціальної ренти.

Економічній оцінці підлягають ті елементи природи, які пов'язані з виробничими відносинами. Тільки ресурсна частина природного середовища прилягає до народного господарства, підключається до функціонування державного економічного механізму. Оцінюючи з економічних позицій природні ресурси, слід підкреслити, що економічна оцінка — це не абсолют, притаманний якому-небудь предмету чи явищу, а відображення його значущості в процесі

суспільно корисної діяльності.

Світова практика засвідчує: найбільш дієвими методами є ті, що справляють вплив як на ринок шляхом трансформації зовнішніх витрат (по компенсації збитку) у внутрішні (тобто витрати щодо відвернення забруднень, які включаються у собівартість), так і на ціну товарів, отже — і на їх конкурентоспроможність. Витрати на компенсації збитку або соціальні витрати відображають ефект, що справляє вплив на третю особу, яка безпосередньо не споживає даний продукт. Необхідно, щоб винуватий у забрудненні компенсував ці затрати у вигляді платежу за забруднення чи екологічного податку.

Держава має можливість сама регулювати виплати за забруднення, обираючи одну з форм — стандартну або розширену. Згідно з першою, забруднювач відшкодовує витрати з виконання природоохоронних заходів, приписуваних природоохоронним законодавством. Згідно з другою, забруднювач, крім указаних витрат, має відшкодовувати потерпілим від забруднення завданий їм збиток.

На сучасному переломному етапі розвитку України роль держави у природоохоронній сфері повинна досягти рівноваги з методами ринкового регулювання. Впровадження економічних заходів, посилення ролі державного регулювання можуть сприяти впровадженню безвідходних технологій; зменшенню витрат державного і місцевих бюджетів за рахунок перекладання тягаря екологічної відповідальності на підприємства; економічному витрачанню ресурсів унаслідок зміни поведінки споживачів і впровадження замкнутих технологічних процесів; переорієнтації інвестування на екологічні цілі; підвищенню ефективності адміністративного екологічного регулювання.

Раціональне та екологічно врівноважене природокористування в Україні може бути досягнуте лише за умов послідовної поетапної реалізації стратегії екологічного спрямування соціально-економічного розвитку та мобілізації науково-технічного й економічного потенціалів держави на подолання екологічної кризи. В основу зазначеної стратегії мають бути покладені такі принципи:

- пріоритет екології над економікою, екологічних критеріїв, показників та вимог над економічними;
- раціональне поєднання ринкових і державних економічних та адміністративних важелів регулювання природокористування й екологічних відносин;
- оптимальне поєднання галузевого і територіального управління природокористуванням та природоохороною, перенесення центра ваги й відповідальності за розв'язання ресурсно-екологічних проблем на місцеві органи влади та управління;
- інтеграція екологічного й економічного підходів до розвитку та розміщення продуктивних сил у єдиний еколого-економічний підхід шляхом розробки та застосування науково обґрунтованих еколого-економічних стандартів, нормативів і показників.

Сьогодні найбільш актуальним і проблематичним питанням є врахування екологічних факторів у процесі приватизації. Згідно із законодавством про приватизацію в Україні екологічна складова не є основоположною і не враховується взагалі, тобто капітал приватизованих підприємств не регулюється вартістю відвернутого і фактичного забруднення повітря, земельних, водних, лісових та інших природних ресурсів. У країнах, де швидкими темпами йде приватизація, питання про відповідальність за забруднення навколишнього середовища має особливе значення.

Відповідальність за стан навколишнього середовища виникає в процесі приватизації у зв'язку з іноземними інвестиціями. Іноземні інвестори висловлюють занепокоєність можливістю несподіваних додаткових витрат через необхідність захисту навколишнього середовища в ході функціонування підприємств [4].

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що повномасштабні бойові дії на території України завдали суттєвих збитків сільськогосподарським угіддям, спричинивши як прямі, так і опосередковані екологічні та економічні наслідки. Пошкодження земель проявляються у вигляді вирв від вибухів, слідів від важкої військової техніки, знищення рослинного покриву, ерозії, ущільнення ґрунтів, хімічного забруднення та замінування територій.

Методи дистанційного зондування Землі довели свою ефективність, як інструмент для моніторингу постраждалих територій, особливо в умовах обмеженого доступу, або небезпеки для проведення польових досліджень. Оптичні та радарні дані, зокрема знімки Sentinel-1 та Sentinel-2, дозволяють не лише ідентифікувати пошкоджені поля, але й здійснювати оцінку ступеня деградації та відстежувати процеси відновлення земель.

Визначено, що найбільш поширеними наслідками воєнних дій для аграрних угідь є:

- зменшення площ орних земель через пошкодження, або занедбання;
- погіршення фізичних і хімічних властивостей ґрунтів;
- зростання площ, уражених інвазійними видами рослин;
- знищення, або пошкодження сільськогосподарської інфраструктури, зокрема іригаційних систем;
- обмеження доступу до земель через мінування.

Комплексний аналіз факторів і наслідків бойових дій з використанням ДЗЗ дозволяє:

- здійснювати оперативну оцінку пошкоджень на великій території;
- визначати пріоритетні ділянки для відновлення;
- прогнозувати потенційну врожайність і придатність земель до сільськогосподарського використання;
- формувати науково обґрунтовані рекомендації для планування післявоєнної відбудови.

Запропонований підхід із застосуванням алгоритмів автоматичного виявлення пошкоджень на основі супутникових даних та індексів вегетації дозволяє підвищити точність і швидкість аналізу, а також інтегрувати результати в системи управління земельними ресурсами. Використання ДЗЗ у поєднанні з наземними обстеженнями дозволить створити інтегровану систему моніторингу стану земель сільськогосподарського призначення, що є критично важливим для сталого розвитку аграрного сектору України у післявоєнний період.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Використання супутникових даних у дослідженні екологічних та економічних наслідків війни для сільськогосподарського сектору в Україні. URL:<https://uwecworkgroup.info/uk/satellite-data-aids-the-study-of-the-wars-environmental-and-economic-consequences-for-ukraines-agriculture-sector/>.
2. Гаврилюк Ф.Ф. Застосування методів ГІС та ДЗЗ для моніторингу аграрних земель. Львів, 2022.
3. Лялько В.І., Мірошніченко, О.А. Основи дистанційного зондування Землі. Київ, 2020.
4. Охорона навколишнього середовища в Україні. URL:https://osvita.ua/vnz/reports/gov_reg/17902/.
5. Про охорону земель: Закон України № 962-IV від 19.06.2003 р. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/go/962-15>.
6. Рижок З. Р., Поляковська Л. Л., Ступень Р. М., Колодій П. П. Математична обробка геодезичних вимірів: навч. посібник. Львів: «Галицька видавнича спілка», 2020. 179 с.
7. Рижок З.Р. Застосування систем координат у структурі геопросторових даних. Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали XXII Мінар. наук.-практ. форум. (м. Львів, 5-7 жовтня 2021 р.). Львів, 2021. С. 22-25.
8. Четверіков Б. В., Калинич І. В. Методика застосування даних дистанційного зондування землі в оцінці наслідків надзвичайних ситуацій. Львів, 2022.
9. Achasov A., Seliverstov O. Дистанційний моніторинг наслідків бойових дій на території Харківської області. URL:https://www.researchgate.net/publication/374120694_Remote_monitoring_of_the_consequences_of_hostilities_on_the_territory_of_the_Kharkiv_region.
10. Butenko Ye., Petrychenko S. Monitoring and Assessment of the Scale of Destruction by Remote Sensing Methods During the War in Ukraine. URL:

<https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510105>. — Дата звернення: 12.08.2025.

11. Butenko Ye., Shtogryn H., Petrychenko S., Olishevskiy V., Vasylenko Kh. The Use of Remote Sensing Methods for Monitoring and Assessing the Scale of Destruction during the War on the Example of the Southern Regions of Ukraine URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510073>. — Дата звернення: 12.08.2025.

12. Copernicus Emergency Management Service (EMS). On-demand Mapping — activations & products. URL: <https://mapping.emergency.copernicus.eu/>. — Дата звернення: 12.08.2025.

13. ESA Copernicus Sentinel Data. URL: <https://sentinel.esa.int/>.

14. European Commission, Joint Research Centre. Mapping for Crisis Management. URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC136897/JRC136897_01.pdf.

15. Google Earth Engine Documentation. URL: <https://developers.google.com/earth-engine>.

16. JRC MARS Bulletin – Crop monitoring in Ukraine. European Commission, 2024. URL: <https://mars.jrc.ec.europa.eu/>.

17. Lambin, E. et al. An open-source tool for mapping war destruction at scale in Ukraine. URL: <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02183-7>. — Дата звернення: 12.08.2025.

18. Nemoshkalov A. Application of Remote Sensing Methods for Assessing Land Damage Resulting from Military Operations. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510075>.

19. Semenyaka V.Yu. Моніторинг впливу військових дій на довкілля за допомогою засобів ГІС та методів дистанційного зондування Землі. URL: <https://ir.library.knu.ua/handle/123456789/5337>. — Дата звернення: 12.08.2025.

20. Stankevich S.A., Kozlova A.O., Andreiev A.A., Golubov S.I., Lysenko, A.R. Remote Assessment of Shelterbelt Conditions after Military Actions. URL: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.2.281>.

21. Stupen R., Ryzhok Z., Stupen N., Stupen O. Application of remote sensing

technologies to determine the content of soil fertility main elements. Management, Economic Engineering in Agriculture and rural development. Vol. 21, Issue 1. P. 735-740. URL: <http://managementjournal.usamv.ro/index.php/scientific-papers/2473-application-of-remote-sensing-technologies-to-determine-the-content-of-soil-fertility-main-elements>.

22. Udovychenko V., Petrovskyi I. War-Related in Ukraine Urban Landscapes Damage Assessment Using Radar Data Change Detection Algorithm. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510041>. — Дата звернення: 12.08.2025.

23. WarScan – Ukrainian agricultural damage monitoring portal. URL: <https://warscan.land>.