

УДК 355.40;356.251

Vladyslav Vasylenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

Taras Trysnyuk, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

Yaroslav Berchun, PhD, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9373-2870> **e-mail:** berchun93@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY FOR PASSIVE LOCATION OF DYNAMIC EVENTS IN THE BORDER ZONE

Abstract. *This article presents the results of a research project focused on developing an information technology for passive localization of dynamic events in the border areas of Chernihiv region, Ukraine – a territory continuously affected by artillery shelling and military activity due to ongoing armed aggression. The proposed system integrates multiple components: sensor-based measurement modules (seismic and acoustic detectors), digital catalogs of amplitude-frequency spectral patterns, geoinformation services, signal processing techniques, and predictive analytics. The research utilizes data from various sources – sensor networks, high-resolution satellite imagery, and open-source web platforms – all integrated into a multilayered system architecture powered by modern data processing tools.*

During the scientific research, the following results were obtained: the hardware and software complex of passive location was improved; digital catalogs of spectra of civil and military equipment were formed; GIS risk models were created for the border strip of Chernihiv region; modern forecasting methods were applied; a decision support system was developed; the possibilities of integrating the technology into the national early warning system were substantiated.

The outcome includes dynamic risk maps, thermal maps of forest burnouts and agricultural degradation, polygonal models of affected territories, and spatio-temporal diagrams of threat activity. Forecasting modules were implemented using statistical models such as ARIMA and Prophet, as well as deep learning models based on LSTM networks, allowing accurate prediction of repeated shelling or vehicle movement patterns. The practical relevance of this work lies in the possibility of integrating the developed technology into Ukraine's national early warning system. The system can be effectively used by local authorities, the State Emergency Service, and military units to monitor the security environment, ensure timely response, and minimize casualties and infrastructure damage in vulnerable border communities.

Keywords: *passive localization, geographic information systems, Chernihiv region, time series analysis, forecasting, monitoring.*

В.М. Василенко, Т.В. Триснюк, Я.О. Берчун

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
м. Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПАСИВНОЇ ЛОКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ПОДІЙ У ПРИКОРДОННІЙ СМУЗІ

Анотація. У статті представлено результати науково-дослідної роботи, спрямованої на розробку інформаційної технології пасивної локації динамічних подій у прикордонних районах Чернігівської області, що зазнають постійних обстрілів та техногенного навантаження внаслідок воєнної агресії. Запропонована система інтегрує кілька компонентів: сенсорні вимірювальні модулі (сейсмічні та акустичні датчики), цифрові каталоги амплітудно-частотних характеристик подій, геоінформаційні сервіси, алгоритми обробки сигналів і прогнозу аналітику. У дослідженні використовуються дані з декількох джерел – сенсорних мереж, супутникових знімків високої роздільної здатності та відкритих веб-ресурсів, які інтегруються в багаторівневу архітектуру з використанням сучасних засобів обробки даних.

Результатом стало створення динамічних карт ризику, теплових карт вигорання лісів та деградації сільськогосподарських угідь, полігональних моделей пошкоджених територій та просторово-часових графіків активності загроз. Також реалізовано модулі прогнозування з використанням статистичних моделей ARIMA та Prophet, а також глибинного навчання на базі рекурентних LSTM-мереж, що забезпечують точне передбачення повторних обстрілів або переміщень техніки. Практична значущість роботи полягає в можливості інтеграції розробленої технології у національну систему раннього оповіщення України. Вона може бути використана органами місцевого самоврядування, підрозділами ДСНС та військовими структурами для моніторингу обстановки, своєчасного реагування та мінімізації втрат серед населення прикордонних територій.

Ключові слова: пасивна локація, геоінформаційні системи, Чернігівська область, аналіз часових рядів, прогнозування, моніторинг.

[https:// doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.97-107](https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.97-107)

Вступ

З початку широкомасштабної збройної агресії проти України територія Чернігівської області стала ареною активних бойових дій. У перші місяці війни на прикордонних напрямках відбулося значне зосередження артилерійських систем, бронетехніки та іншої військової техніки. Наслідком стали масові обстріли населених пунктів, руйнування об'єктів критичної інфраструктури, пошкодження транспортної мережі, житлових кварталів та соціальних установ. Це створило передумови для гострої потреби у створенні науково обґрунтованих технологій моніторингу та систем раннього оповіщення, здатних виявляти динамічні події у прикордонній смузі.

Проблематика пасивної локації особливо актуальна у воєнних умовах, коли використання активних систем спостереження може становити додатковий ризик. Пасивні методи ґрунтуються на реєстрації акустичних, сейсмічних або електромагнітних коливань, що виникають унаслідок руху військової техніки,

вибухів або артилерійських пострілів. Це дозволяє здійснювати ідентифікацію загроз без випромінювання сигналів і, відповідно, без викриття позицій системи моніторингу.

Актуальність дослідження обумовлена зростанням загроз для цивільного населення та інфраструктури прикордонних регіонів України внаслідок збройної агресії. Чернігівська область із 2022 року систематично зазнає артилерійських і мінометних обстрілів, що спричиняє не лише людські втрати, а й екологічні наслідки, зокрема пожежі, деградацію сільськогосподарських угідь і руйнування лісових масивів [1–3]. Традиційні методи моніторингу є недостатніми для оперативного аналізу, а наявні системи раннього оповіщення потребують розширення функціоналу. Міжнародний досвід (Copernicus EMS, UN-SPIDER, NATO, FEMA) показує ефективність інтеграції ГІС, дистанційного зондування та сенсорних систем у кризовому управлінні [8–11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні наукові розробки у сфері моніторингу надзвичайних ситуацій демонструють високий потенціал пасивних сенсорних мереж для виявлення обстрілів, руху техніки та інших аномальних подій. Зокрема, у [4–7] розглядається використання розподілених акустичних сенсорів для моніторингу вибухів і пересування бронетехніки. У дослідженнях [8–11] показано ефективність інтеграції супутникових даних, ГІС-аналітики та алгоритмів обробки великих обсягів даних для формування систем ситуаційної обізнаності в режимі реального часу. Проте більшість рішень зосереджені на постфактум аналізі або мають високу вартість розгортання в умовах бойових дій.

Метою роботи є розроблення засобів та інструментів системи раннього оповіщення про активність ворога в приграничній смузі та підтримка прийняття рішень щодо визначення локації потенційної загрози як елемента сейсмічної розвідки.

Об'єктом дослідження є пасивний моніторинг динамічних подій у прикордонній смузі на основі акустичних та сейсмічних сигналів, спричинених бойовими діями.

Виклад основного матеріалу дослідження

Наукові дослідження спрямовані на вдосконалення апаратно-програмного комплексу пасивної локації. На знімках території Чернігівської області чітко простежуються наслідки артилерійських і ракетних ударів: зруйновані житлові квартали, пошкоджені промислові об'єкти, вигорання лісових масивів і полів. Просторовий аналіз супутникових зображень дає змогу визначати масштаби руйнувань, відстежувати динаміку змін у часі та локалізувати найнебезпечніші ділянки.

Важливим є поєднання цих знімків із даними сейсмоакустичного моніторингу. Наприклад, кожен вибух або пересування колони техніки залишає специфічний спектральний відбиток, який може бути зареєстрований спеціалізованими датчиками. У поєднанні з супутниковими картами ці дані дозволяють не лише зафіксувати сам факт події, а й визначити її характер: рух цивільного транспорту, роботу сільськогосподарської техніки чи пересування бойових машин.

Такий підхід формує підґрунтя для побудови комплексної інформаційної технології пасивної локації, здатної інтегрувати багатоканальні дані в єдиному аналітичному середовищі.

Система включає сейсмічні та акустичні сенсори, блок збору даних, промисловий комп'ютер, модулі попередньої обробки й передачі у хмарне середовище, інтеграцію у геоінформаційну систему [4–7]. Це дозволило підвищити достовірність і швидкість фіксації динамічних подій. Значну увагу приділено створенню цифрових каталогів амплітудно-частотних спектрів. Для цивільної техніки (трактори, комбайни, транспортні засоби) сформовано окрему базу даних, яка дозволяє відрізнити господарську активність від військових загроз. Для військової техніки (танки, САУ, міномети) створено базу характерних спектрів, що забезпечує автоматизовану ідентифікацію та зменшення кількості хибних сигналів. Важливим результатом є побудова ГІС-моделі прикордонної смуги Чернігівської області. У моделі поєднано сенсорні вимірювання, супутникові знімки та відкриті інтернет-дані. Побудовано карти ризику, що відображають зони високої, середньої та низької небезпеки. Аналіз відкритих джерел інформації є важливим інструментом у дослідженнях воєнної обстановки, особливо для прикордонних регіонів, які систематично зазнають вогневого впливу противника. Для Чернігівської області, що межує з російською федерацією та республікою білорусь, такі джерела формують основу для створення цифрової геопросторової бази даних обстрілів і прогнозування майбутніх загроз. Вони охоплюють широкий спектр інформаційних ресурсів: від супутникових знімків міжнародних компаній до інтерактивних карт громадських ініціатив і повідомлень офіційних державних органів.

Особливе значення мають супутникові знімки високої роздільної здатності, що дозволяють фіксувати не лише масштабні руйнування, але й локальні наслідки атак – пошкодження окремих будівель, вирви від артилерійських снарядів або згорілі сільськогосподарські поля. Використання мультиспектральних сенсорів робить можливим виявлення теплових аномалій, характерних для пожеж, що супроводжують обстріли, або для нових місць розміщення техніки. Прикладом є регулярна фіксація масштабних пожеж у лісових масивах Чернігівського та Новгород-Сіверського районів, які виникали внаслідок ракетно-артилерійських ударів.

Період із лютого 2022 року по 2025 рік став для Чернігівської області надзвичайно складним з точки зору безпеки, адже регіон постійно перебуває під загрозою артилерійських і мінометних обстрілів, авіаційних ударів та диверсійних дій противника. Аналіз динаміки атак на прикордонні дозволяє простежити еволюцію воєнної активності та сформувати базу для прогнозування майбутніх загроз. Карта області показує, що найбільша інтенсивність атак спостерігалась у прикордонних громадах – Семенівській, Городнянській та Новгород-Сіверській, а також у районі обласного центру. Найбільш інтенсивна фаза обстрілів припала на перші місяці повномасштабної агресії, коли місто Чернігів опинилося в умовах фактичної блокади. У цей період масовані удари наносилися як по цивільній інфраструктурі, так і по об'єктах оборонного значення. Протягом березня 2022 року було зафіксовано сотні випадків артилерійських і авіаційних атак, унаслідок яких місто зазнало серйозних руйнувань. Після відходу противника від обласного центру активність обстрілів зменшилася, однак вони зосередилися на прикордонних районах.

Упродовж 2023 року відбувся перехід від хаотичних ударів до систематичних обстрілів сіл і містечок, розташованих безпосередньо біля державного кордону. Найбільше страждали громади Семенівська, Новгород-Сіверська та Городнянська. За даними відкритих джерел, лише протягом весни 2023 року у прикордонні було зафіксовано понад 700 випадків обстрілів різного типу. Це свідчить про цілеспрямовану тактику виснаження населення прикордонних територій та створення перманентної зони небезпеки.

У 2024 році кількість атак залишалася стабільно високою, але з'явилися нові тенденції. Противник почав активно застосовувати змішану тактику: поєднання артилерійських ударів із використанням безпілотних літальних апаратів для коригування вогню. Це призвело до збільшення точності обстрілів і до зростання кількості жертв серед цивільного населення. Крім того, у 2024 році було зафіксовано збільшення інтенсивності обстрілів транспортної інфраструктури: залізничних станцій, мостів, ділянок автошляхів. На початку 2025 року динаміка атак демонструє збереження високого рівня загрози. Систематичні обстріли прикордонних громад стали буденністю: лише протягом одного тижня лютого 2025 року у регіоні було зафіксовано майже 200 атак різного масштабу. Така частота свідчить про прагнення противника підтримувати постійну напругу, обмежувати можливості розвитку регіону та деморалізувати місцеве населення.

Застосування методів просторово-часового аналізу дозволяє визначити певні закономірності у динаміці атак. По-перше, вони мають виражену хвильову структуру: періоди високої інтенсивності змінюються відносним затишшям, але загальна тенденція залишається стабільно високою (рис. 1).

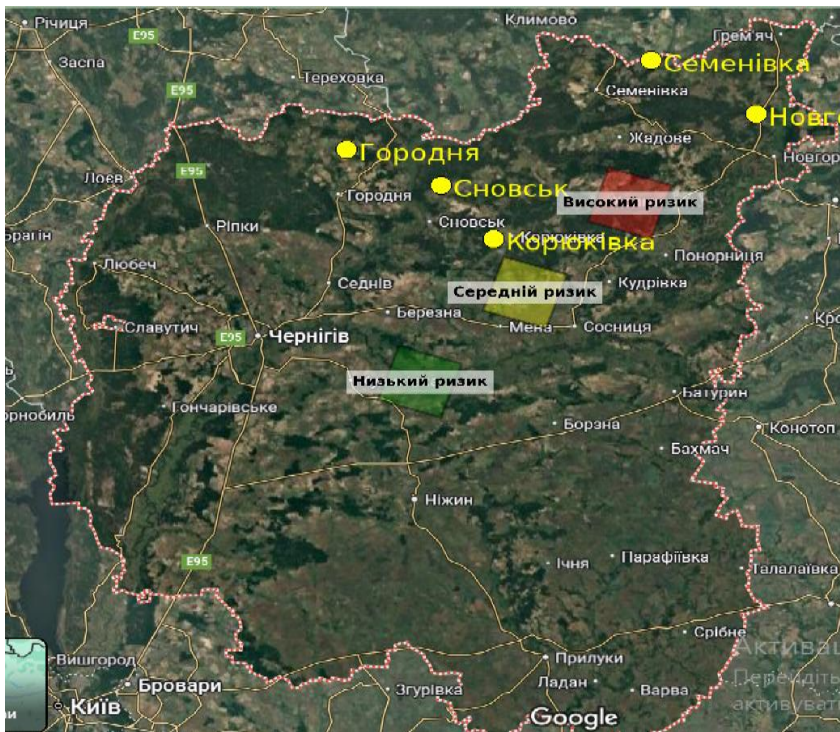


Рис. 1. Карта Чернігівської області з прикордонною смугою та основними точками атак

По-друге, простежується залежність між зростанням атак і певними політичними чи військовими подіями – проведенням переговорів, початком ротації військових частин, активізацією боїв на інших напрямках. По-третє, характер атак змінюється у залежності від пори року: взимку зростає кількість артилерійських обстрілів, тоді як у літній сезон активніше застосовуються безпілотники та тактика підпалів лісів і полів.

Теплові карти вигорання та полігональні моделі уражених територій забезпечили можливість кількісного аналізу площ пошкоджень [12–14]. Аналіз індексів рослинності (NDVI) і коефіцієнтів вигорання (NBR) дозволяє картографувати пошкоджені ділянки лісів і полів, що характерно для прикордонної смуги Чернігівщини (рис. 2).

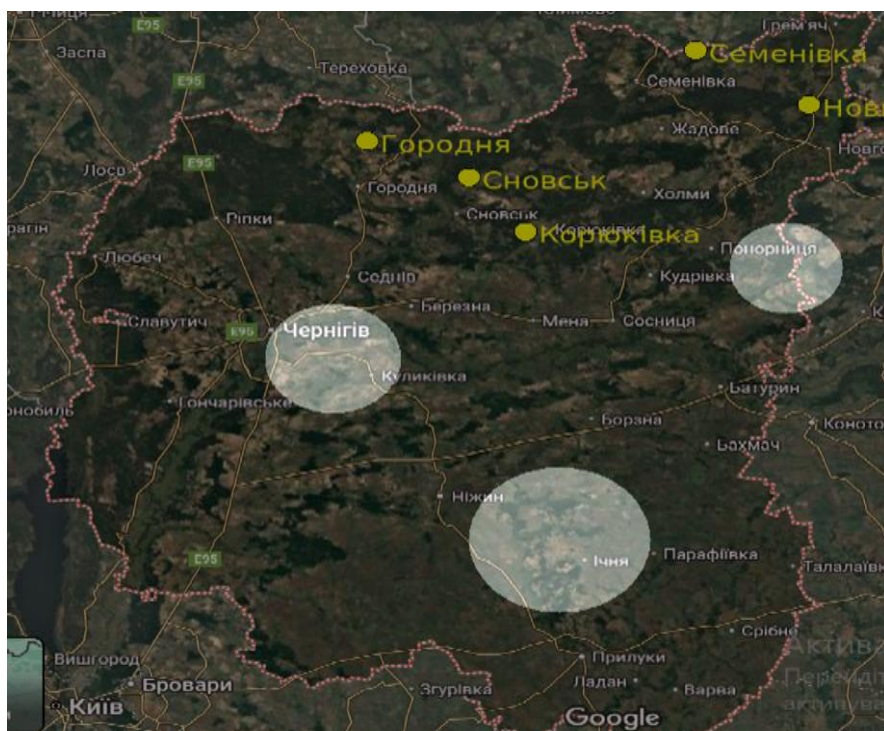


Рис. 2. Теплова карта вигорання лісових і польових територій

Розробка інформаційної технології пасивної локації динамічних подій у прикордонній смузі ґрунтується на інтегрованому підході, який поєднує методи збору даних, алгоритми їх обробки та засоби геоінформаційної візуалізації. На відміну від активних систем радіолокації чи оптико-електронного спостереження, пасивні технології не випромінюють власного сигналу, що забезпечує прихованість роботи та безпеку у воєнних умовах. На основі часових рядів обстрілів у Семенівській, Сновській та Новгород-Сіверській громадах розроблено прогностичні моделі з використанням ARIMA, Prophet і LSTM-мереж [13, 18]. Це дозволило передбачати тенденції обстрілів на горизонті 7–14 днів. Верифікація результатів показала високу відповідність між прогностичними та фактичними даними.

Рис. 3 (радарна діаграма) узагальнює дані у вигляді багатовимірної візуалізації. Такий формат зручний для інтегрованого аналізу, адже дозволяє побачити баланс сильних і слабких сторін кожного підходу в комплексі. Полігональні зони мають більш «врівноважений» профіль, тоді як теплові карти демонструють пікові значення лише за критеріями швидкості та наочності.

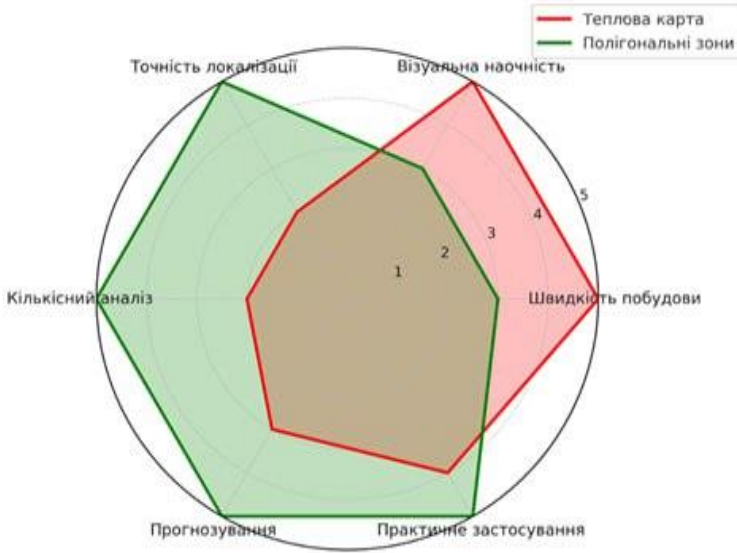


Рис. 3. Радарна діаграма порівняння методів візуалізації (теплові карти та полігональні зони)

Таким чином, обидва методи мають свою специфічну нішу. Теплові карти забезпечують швидке виявлення «гарячих точок» і загальну візуалізацію тенденцій, але поступаються полігональним зонам у точності та можливостях кількісного аналізу. Полігональні карти, навпаки, дозволяють отримати детальні дані, що мають прикладне значення для практичних рішень, однак вимагають більшого часу для дешифрування знімків.

Суттєвою складовою є створення системи підтримки прийняття рішень, орієнтованої на органи місцевої влади, ДСНС та військові структури. Система використовує матриці рішень, сценарний аналіз і картографічну візуалізацію для оперативного реагування. Теплові карти дозволяють наочно представити просторовий розподіл вогневого впливу та його інтенсивність. Для прикладу, теплове моделювання даних у Семенівській громаді показало чітку концентрацію «гарячих точок» вздовж північної прикордонної смуги. У період із травня по жовтень 2023 року у цій зоні теплові карти зафіксували значно вищу щільність пожеж у порівнянні з центральними районами громади, що підтвердило дані супутникових знімків Sentinel-2. У Сновській громаді аналогічний підхід дав змогу виявити періодичні спалахи вигорання біля залізничних вузлів, що вказує на прицільні обстріли транспортної інфраструктури. Таблиця 1 дозволяє коротко порівняти оперативність і точність методів, показуючи, що теплові карти є більш придатними для швидкого реагування, а полігональні – для детального аналізу й управлінських рішень.

Головною перевагою теплових карт є оперативність аналізу: достатньо базового набору даних (координати й час подій), щоб отримати візуальне уявлення про масштаби проблеми. Теплова карта є також ефективним інструментом для інформування органів державної влади, міжнародних партнерів чи місцевого населення, оскільки вона інтуїтивно зрозуміла навіть без спеціальної підготовки. Водночас слабким місцем теплового підходу є його умовність: межі зон не мають чіткої просторової фіксації, що ускладнює застосування даних для розрахунків площ або планування конкретних заходів із ліквідації наслідків. Для узагальнення результатів проведено порівняння теплових карт і полігональних зон.

Таблиця 1. Порівняння характеристик теплових карт і полігональних зон для візуалізації вигорання територій (2022-2024 рр.)

Критерій	Теплова карта	Полігональні зони
Швидкість побудови	Дуже висока, достатньо мінімального набору даних (координати + час).	Потребує додаткової дешифрації супутникових знімків та верифікації меж.
Візуальна наочність	Інтуїтивно зрозуміла, чітко виділяє «гарячі точки».	Менш ефектна для огляду, але надає точні просторові межі.
Точність просторової локалізації	Низька: межі зон умовні, орієнтовні.	Висока: зони мають чіткі полігональні контури.
Можливість кількісного аналізу	Обмежена: складно визначати площі чи проводити геостатистичні обчислення.	Повна: можна обчислювати площі, відсотки покриття, інтегрувати в ГІС-аналіз.
Придатність для прогнозування	Підходить для загальної оцінки тенденцій і визначення концентрацій.	Підходить для сценарного прогнозування і побудови моделей ризику.
Застосування у практиці	Використовується для швидких звітів, презентацій, ситуаційного аналізу.	Застосовується для стратегічного планування, рекультивації, оцінки збитків.
Приклад у Чернігівській області	У Семенівській громаді тепла карта показала три «гарячі зони» у 2023 р.	У Новгород-Сіверській громаді полігони дозволили оцінити понад 250 га вигорання.

Архітектурна модель геоінформаційної системи (ГІС) для моніторингу прикордонних територій Чернігівської області базується на принципі багаторівневої організації даних та модульної побудови програмного комплексу. Такий підхід забезпечує масштабованість, надійність і можливість гнучкої адаптації до динамічних умов воєнного часу. Архітектура включає кілька взаємопов'язаних рівнів:

1. Рівень збору даних. На цьому рівні відбувається первинна реєстрація подій за допомогою сенсорів, супутників і OSINT-ресурсів.
2. Рівень попередньої обробки. Дані з різних джерел синхронізуються у часі та приводяться до єдиного формату.
3. Рівень зберігання даних. Центральним ядром є база геопросторових даних (PostgreSQL + PostGIS). Тут кожна подія має атрибутивний опис.

4. Аналітичний рівень. Цей рівень реалізує просторово-часовий аналіз, кластеризацію та прогнозування.
5. Рівень візуалізації. Результати аналізу відображаються у вигляді карт і графіків.
6. Рівень оповіщення. Заключним елементом є система раннього попередження. Вона формує автоматичні повідомлення для органів влади та цивільного населення у разі високої ймовірності повторного обстрілу.

Розробка геоінформаційної системи для прикордонних територій Чернігівської області має не лише наукове, але й безпосереднє прикладне значення. На відміну від класичних картографічних чи статистичних інструментів, ГІС у даному випадку розглядається як інтегрована аналітична платформа, здатна підтримувати процес прийняття рішень у режимі, наближеному до реального часу. Її прикладна роль полягає у тому, щоб забезпечити оперативний моніторинг, формування карт ризику, прогнозування повторних атак, а також інтеграцію в систему раннього оповіщення населення та органів влади.

Висновки

У ході виконання наукового дослідження отримано такі результати: вдосконалено апаратно-програмний комплекс пасивної локації; сформовано цифрові каталоги спектрів цивільної та військової техніки; створено ГІС-моделі ризиків для прикордонної смуги Чернігівщини; застосовано сучасні методи прогнозування; розроблено систему підтримки прийняття рішень; обґрунтовано можливості інтеграції технології у національну систему раннього оповіщення. Робота має практичну значимість для захисту населення та інфраструктури прикордонних громад і може бути масштабована для інших регіонів України та інтегрована у міжнародні системи моніторингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang Y., Li X. GIS-based spatio-temporal risk modeling for conflict-affected regions. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14(11), pp. 2211–2225.
2. Трофимчук О.М. Технології просторового аналізу для управління ризиками в умовах воєнних дій. *Вісник НАН України*, 2022, №7, с. 23–34.
3. UN-SPIDER: United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.un-spider.org/>
4. Хавкін, О.К., Калюх, Ю.І., Мар'єнков, М.Г., Глуховський, В.П., Приємський, В.Д. (2008). Моніторинг будівельних конструкцій і застосування нових державних норм ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України». *Будівельні конструкції: Зб. наук. праць*, 69, 26-44.
5. Василенко В., Охарєв В., Триснюк Т., Ющенко К. Цифровізація процесів управління персоналом для повоєнного відновлення України. Екологічна безпека та природокористування, Київський нац. ун-т будівництва та архітектури, 2025, вип. 54(2), с. 136–142. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.136-142>
6. Триснюк В.М., Марущак В.М. Інформаційні технології для візуалізації та обробки даних у сфері геопросторової розвідки. Телекомунікаційні та інформаційні технології, ДУІКТ, 2024, №4(85), с. 113–118. ISSN 2412-4338. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.044726>

7. Smith J., Anderson R. Machine learning for time-series forecasting of dynamic events. *Journal of Geoinformatics*, 2021, vol. 8(2), pp. 77–89.
8. Marienkov, M., Kaliukh, I., Trofymchuk, O. (2024). The digital twin use for modeling the multi-storey building response to seismic impacts. *Structural Concrete*, 25, (3), 2079–2096. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.202300695>
9. Трофимчук О.М., Петренко С.В. Еколого-геоінформаційні системи та їх застосування у моніторингу небезпечних процесів. Київ: Академперіодика, 2023. – 298 с.
10. Copernicus Emergency Management Service. European Commission [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://emergency.copernicus.eu/>
11. Horner C., Miller D. Deep learning for battlefield event detection. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, vol. 61, pp. 520–534.
12. Liu H., Wang Z. Integration of satellite data and GIS for early-warning systems. *Int. J. of Applied Earth Observation*, 2020, vol. 91, pp. 102–113.
13. Petrov P., Ivanov D. Passive localization technologies in modern border security systems. *European Security Review*, 2021, №9, pp. 112–123.
14. Borrelli P., Panagos P. Mapping fire-induced land degradation using remote sensing. *Land Degradation & Development*, 2021, vol. 32(15), pp. 4337–4349.

Стаття надійшла до редакції 23.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 26.08.2025

REFERENCES

1. Zhang, Y., & Li, X. (2022). GIS-based spatio-temporal risk modeling for conflict-affected regions. *Remote Sensing*, 14(11), 2211–2225.
2. Trofymchuk, O.M. (2022). Spatial analysis technologies for risk management in wartime conditions. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 7, 23–34 [in Ukrainian].
3. UN-SPIDER: United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response. Retrieved from <https://www.un-spider.org>
4. Khavkin, O.K., Kalyukh, Y.I., Mar'enkov, M.G., Glukhovsky, V.P., & Priemsky, V.D. (2008). Monitoring of building structures and application of new state standards DBN V.1.1-12:2006 “Construction in seismic areas of Ukraine”. *Building structures: Collection of scientific works*, 69, 26–44 [in Ukrainian].
5. Vasylenko, V., Okharev, V., Trysniuk, T., & Yushchenko, K. (2025). Digitalization of human resource management processes for Ukraine’s post-war recovery. *Environmental Safety and Natural Resources*, 54(2), 136–142. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.136-142> [in Ukrainian].
6. Trysniuk, V.M., & Marushchak, V.M. (2024). Information technologies for visualization and data processing in geospatial intelligence. *Journal of Telecommunication and Information Technologies*, State University of Telecommunications, 4(85), 113–118. ISSN 2412-4338. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.044726> [in Ukrainian].
7. Smith, J., & Anderson, R. (2021). Machine learning for time-series forecasting of dynamic events. *Journal of Geoinformatics*, 8(2), 77–89.
8. Marienkov, M., Kaliukh, I., & Trofymchuk, O. (2024). The digital twin use for modeling the multi-storey building response to seismic impacts. *Structural Concrete*, 25, (3), 2079–2096. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.202300695>
9. Trofymchuk, O.M., & Petrenko, S.V. (2023). Ecological-geoinformation systems and their application in monitoring of hazardous processes. Kyiv: Akademperiodyka [in Ukrainian].
10. Copernicus Emergency Management Service, European Commission. Retrieved from <https://emergency.copernicus.eu>
11. Horner, C., & Miller, D. (2023). Deep learning for battlefield event detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 520–534.

12. Liu, H., & Wang, Z. (2020). Integration of satellite data and GIS for early-warning systems. *International Journal of Applied Earth Observation*, 91, 102–113.
13. Petrov, P., & Ivanov, D. (2021). Passive localization technologies in modern border security systems. *European Security Review*, 9, 112–123.
14. Borrelli, P., & Panagos, P. (2021). Mapping fire-induced land degradation using remote sensing. *Land Degradation & Development*, 32(15), 4337–4349.

The article was received 23.06.2025 and was accepted after revision 26.08.2025

Василенко Владислав Михайлович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу інформаційних та комунікаційних технологій Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

Триснюк Тарас Васильович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу прикладної інформатики Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

Берчун Ярослав Олександрович

PhD, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9373-2870> **e-mail:** berchun93@gmail.com