



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.4.277>

УДК 528.8

Обґрунтування переваг у використанні оптичних та радарних даних ДЗЗ при виявленні будівель, порушених внаслідок природного чи антропогенного впливу

Л. Р. Скрипник*, В. Ю. Беленок, Ю. І. Великодський, Н. Ф. Іщенко, О. О. Клименко

Державний університет “Київський авіаційний інститут”, проспект Любомира Гузара, 1, Київ, 03058, Україна

В огляді розглянуто переваги та можливості використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для виявлення та оцінювання пошкоджених будівель, особливо в умовах природного або антропогенного впливу, такого як військові дії. Основною метою дослідження було обґрунтування ефективності комплексного підходу до моніторингу та оцінювання стану будівель за допомогою методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), використовуючи дані оптичного та радіо-діапазонів, зокрема в контексті війни. Це поєднання дало змогу комплексно оцінити стан об'єктів, що стало необхідним для прийняття обґрунтованих рішень у кризових ситуаціях.

У дослідженні підкреслено важливість швидкого та точного оцінювання стану будівель та інфраструктури, що критично важливо для забезпечення безпеки населення. Такі оцінки сприяли плануванню евакуаційних маршрутів, організації тимчасового житла та координації відновлювальних робіт. Технології SAR (Synthetic Aperture Radar – радар із синтезованою апертурою, РСА) забезпечують отримання високоякісних радіолокаційних зображень незалежно від часу доби та погодних умов, що дуже корисно в умовах обмеженого доступу до постраждалих територій через бойові дії чи природні катастрофи. Оптичні дані надають додаткову інформацію про пошкодження та дали змогу точніше оцінити ступінь руйнувань.

У статті також порівняно методи, які використовувались у різних дослідженнях для оцінювання руйнувань будівель, викликаних чинниками антропогенного чи природного походження. Встановлено, що з цією метою використовуються методи, які ґрунтуються або на даних ДЗЗ до та після руйнувань (багаточасові методи) або лише на даних після руйнувань (моночасові методи). При цьому, використовуються, як правило, дані ДЗЗ оптичного діапазону, радарні дані, дані висоти (LIDAR, стереопари аерознімків або супутникових даних надвисокого просторового розрізнення) та ГІС, а також комбінування даних. Це дало змогу підвищити надійність виявлення зруйнованих будівель та оцінити ступінь руйнувань, адаптувати методи ДЗЗ до різноманітних сценаріїв надзвичайних ситуацій.

Висновки статті акцентують на важливості інтеграції різних типів даних та розвитку методів машинного навчання для підвищення точності аналізу. Практичне застосування описаних методів ДЗЗ включало оцінювання збитків після природних катастроф або військових дій, що дало змогу ефективно планувати відновлювальні роботи та забезпечувати безпеку громадян. Такі можливості були критично важливими для управління кризовими ситуаціями та забезпечення стабільності інфраструктури у постраждалих регіонах. Інтеграція даних ДЗЗ оптичного діапазону та SAR являє собою потужний інструмент для оперативного реагування та довгострокового моніторингу, забезпечуючи підтримку громадської безпеки та планування відновлення в умовах кризових ситуацій.

Ключові слова: технології дистанційного моніторингу, віддалене оцінювання пошкоджень, радіолокаційне зондування, відновлювальні заходи, аналіз міської інфраструктури, структурні пошкодження, прогнозування ризиків.

© Л. Р. Скрипник, В. Ю. Беленок, Ю. І. Великодський, Н. Ф. Іщенко, О. О. Клименко. 2024

Вступ

Моніторинг та оцінювання стану будівель в умовах природних або антропогенних впливів, особливо під час руйнівної війни, як це відбувається в Україні, є надзвичайно важливими завданнями. Військові дії призводять до значних руйнувань інфраструктури, включаючи житлові та промислові будівлі, мости, дороги та інші ключові об'єкти. Ці руйнування можуть мати як прямі наслідки, так і втрачати життя та знищення майна, так і непрямі, включаючи довгострокові соціальні та економічні наслідки. Оперативне оцінювання стану будівель та інших споруд є критичним для забезпечення безпеки населення, планування евакуаційних маршрутів,

організації тимчасового житла, а також для визначення пріоритетів у відновлювальних роботах.

Одним з основних викликів у цій сфері є необхідність швидкого та точного збору даних про стан будівель та інфраструктури в умовах, коли доступ до багатьох територій може бути обмеженим або небезпечним. У цьому контексті методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) в яких застосовуються оптичні і радарні дані, стають надзвичайно важливими інструментами. ДЗЗ дає змогу отримувати дані на великих територіях, що особливо корисно в умовах кризи, коли традиційні методи збору інформації можуть бути недостатньо ефективними або взагалі недоступними. SAR-технології забезпечують можливість отримання високоякісних радіолокаційних зображень незалежно від часу доби та погодних умов, що дає змогу

*E-mail: lskrypnyk204@gmail.com

здійснювати моніторинг навіть вночі або при хмарності.

Однак, незважаючи на переваги використання даних ДЗЗ, є низка проблем, пов'язаних з їх застосуванням у поточній ситуації. Однією з основних проблем є складність інтерпретації радіолокаційних зображень, передусім в міських умовах, де складна структура будівель може становити різні перешкоди та артефакти. Ще однією проблемою є необхідність у постійних оновленнях даних, оскільки ситуація на місцях може швидко змінюватися, і старі дані можуть не відображати актуальний стан об'єктів.

Для розв'язання цих проблем необхідно вдосконалити методи оброблення та інтерпретації даних, забезпечити доступ до сучасних технологій та навчання персоналу, здатного ефективно використовувати ці інструменти. Також важливо розробити стандартизовані протоколи для збирання та оброблення даних, що дасть змогу забезпечити більш точні та надійні результати. У довгостроковій перспективі розвиток національних та міжнародних кооперацій у сфері моніторингу та оцінювання стану будівель за допомогою ДЗЗ та SAR може значно підвищити ефективність реагування на кризи та планування відновлювальних робіт.

Метою статті є обґрунтування особливостей комплексного підходу до моніторингу та оцінювання стану будівель за допомогою методів ДЗЗ оптичного діапазону і SAR в умовах природних та антропогенних впливів, зокрема в умовах війни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та радіолокація з синтезованою апертурою (SAR) мають значні переваги у виявленні пошкоджених будівель після природних або антропогенних катастроф. SAR-дані забезпечують незалежність від погодних умов і часу доби, що є важливо для оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Також SAR дає змогу детально відстежувати зміни в структурі об'єктів завдяки можливості аналізувати текстуру та поляризаційні характеристики. Наприклад, методи, основані на текстурних ознаках, показали високу ефективність, що доводить значення SAR у швидкому та точному моніторингу руйнувань, підвищуючи рівень виявлення до 72,5% при мінімальних хибних спрацюваннях (Kim et al., 2023).

Виділення будівель є ключовим для аналізу міського середовища, підтримки планування та реагування на катастрофи. Завдяки високій роздільній здатності SAR-зображень можна отримати деталізовану інформацію про міські території, але водночас такі дані ускладнюють виділення окремих об'єктів. Метод HRBE-PM пропонує підхід для виділення висотних будівель із SAR-зображень, враховуючи різні типи фасадів і структуру будівель. На основі виділених елементів фасаду та просторових зв'язків створюються гіпотези щодо наявності будівель. Експерименти показали, що точність методу перевищує 85%, і його

можна застосовувати для різноманітних типів будівель в умовах щільної забудови (Liu et al., 2024).

Останні роки стали періодом значних досягнень у галузі моніторингу міських будівель та інфраструктури за допомогою технологій ДЗЗ та SAR. (Volosyuk et al., 2020) дослідили численні методи оцінювання ефективної площі розсіювання (RCS) у SAR. У дослідженні зазначено, що методи значно відрізняються за точністю, швидкістю відновлення RCS для спостережуваних зон та складністю реалізації. Незважаючи на значний прогрес у галузі, автори підкреслюють, що досі не синтезовано оптимальний метод, який би поєднував просторову та часову оптимальну обробку сигналу. Крім того, більшість існуючих методів не враховують стохастичну природу сигналів, відбитих від різних поверхонь, що обмежує точність та роздільну здатність SAR.

Застосування зображення Sentinel-1A та техніки SBAS-InSAR для дослідження просідання землі на рівнині Ханцяжу в Китаї показало, що природні та антропогенні фактори, включаючи зміни в поверхневих навантаженнях, опади та видобуток підземних вод, можуть спричинити значні деформації земної поверхні. Масштабне будівництво інфраструктури, спричинене урбанізацією, також призвело до стійких деформацій землі. Це підкреслює важливість точного моніторингу таких процесів для забезпечення належного міського планування та будівництва (He et al., 2024).

Сучасні збройні конфлікти можуть призводити до значних гуманітарних катастроф, і ДЗЗ є важливим інструментом для моніторингу руйнувань та оцінювання збитків. Зокрема, використання багаточасових зображень SAR дає змогу аналізувати масштаби руйнувань у міських зонах без необхідності наземних обстежень. Запропонований алгоритм, що поєднує нормалізований індекс когерентності подвійної поляризації (DPNCI) та енергетичне мінімізаційне обмеження, ефективно виявляє зони згоряння та серйозні руйнування. Дослідження показало, що дані SAR разом з відкритими джерелами можуть швидко надавати точну інформацію про збитки, що необхідно для оперативного оцінювання гуманітарної ситуації після конфліктів або катастроф (Huang et al., 2023).

Нова структура для перефокусування наземних рухомих цілей за допомогою тіней у відео-SAR дає змогу ефективно виявляти, відстежувати та створювати зображення для кількох рухомих цілей одночасно. Дослідження показало, що тінь від наземних рухомих цілей може бути використана для точного визначення їх положення, що значно покращує можливості систем SAR у спостереженні за рухомими об'єктами (Yang et al., 2020).

Оцінка пошкоджень міської інфраструктури є ключовою для відновлення після конфліктів або катастроф, адже руйнування будівель призводить до значних економічних втрат та загрози життю. Дослідження на основі даних SAR, зокрема Sentinel-1 та технік InSAR, демонструє ефективність дистанційного зондування у виявленні пошкоджень міських будівель після війни. На прикладі міста

Мосул методи Small BAseline Subset (SBAS) та Persistent Scatterer Interferometry (PSI) показали високу точність у визначенні руйнувань, порівнянну з оптичними знімками високого розрізнення. Використання SAR для швидкого й точного моніторингу пошкоджень є цінним інструментом для оцінювання руйнувань у програмах відновлення після війни (Boloogani et al., 2021).

Нова багаточасова структура виявлення змін у будівлях за допомогою SAR може генерувати карти частоти змін (CFM) та карти моментів змін (CMM). Ця методологія дає змогу не тільки визначити наявність змін, але й аналізувати їхню частоту та часову структуру. Такий підхід є важливим для міського управління та планування, оскільки дає змогу детальніше розуміти динаміку міських змін (Zhang et al., 2021). За допомогою постійного часового і просторового моніторингу берегових ліній за оптичними та SAR-зображеннями виявлено, що комбінація оптичних і мікрохвильових методів є ефективною для точнішого моніторингу берегових ліній, насамперед в умовах поганої видимості через хмари або інші перешкоди (Yu et al., 2022).

Структура для напівавтоматизованого оцінювання пошкоджень будівель внаслідок землетрусів за даними InSAR та іншими додатковими наборами даних, подана шляхом застосування машинного навчання для класифікації пошкоджень, що дало змогу ефективно ідентифікувати ступінь пошкоджень будівель. Дослідження підкреслює важливість комплексного підходу до аналізу пошкоджень за різноманітними джерелами даних (Rao et al., 2023). Останні вдосконалення в радарних технологіях дають змогу краще зрозуміти об'єкти культурної спадщини з мікрохвильового погляду, проте необхідні подальші дослідження для оптимізації цих технологій у конкретних культурних контекстах (Chen et al., 2022). Новий режим Rotating SAR (RSAR) для тривимірної реконструкції будівель, що дає змогу отримувати зображення будівель з двох різних кутів за одне обертання. Це значно спрощує процес отримання даних і дає змогу уникнути необхідності проведення декількох польотів або знімань з різних ракурсів. Однак, такий підхід також має свої обмеження, зокрема, в умовах складної міської забудови, де можуть виникати артефакти зображення (Lin et al., 2024). Мікрохвильове дистанційне зондування свідчить про значний потенціал для моніторингу нашої планети, а також про широкі можливості сучасних методологій для виявлення змін за допомогою SAR і їхнє застосування для моніторингу біосфери та гідросфери. Незважаючи на значний прогрес у цій галузі, є певні обмеження, такі як складність інтерпретації даних, особливо в умовах змішаних поверхонь (Amitrano et al., 2024).

Російсько-українська війна показала цінність відкритих даних дистанційного зондування для об'єктивного моніторингу руйнувань інфраструктури. Дані SAR та знімки нічного освітлення допомагають виявити знеструмлення та значні пошкодження в містах на лінії фронту й поза нею, а оптичні зображення фіксують повені вздовж Дніпра після

руйнування Каховської дамби. Використання супутникових зображень у видимому, ближньому інфрачервоному та мікрохвильовому діапазонах дає змогу отримати об'єктивну інформацію про масштаб та характер руйнувань, спричинених бойовими діями, і підкреслює важливість даних оптичного діапазону та SAR для оперативного оцінювання наслідків воєнних і природних катастроф (Xu, Barbot and Wang, 2024).

Таким чином, попри значний прогрес у використанні даних оптичного діапазону та SAR для моніторингу будівель, існують прогалини, що потребують подальших досліджень. Зокрема, необхідно вдосконалити алгоритми обробки та інтерпретації даних, розробити нові методи інтеграції даних з різних джерел, а також провести додаткові дослідження для покращення точності та зниження витрат на використання цих технологій. Це дасть змогу підвищити ефективність моніторингу, зменшити ризики для громадської безпеки та забезпечити більш надійні основи для планування відновлювальних робіт.

На сьогодні немає публікацій, в яких би чітко підкреслювалась важливість удосконалення методів ДЗЗ за допомогою даних оптичного діапазону та SAR у контексті ліквідації руйнівного впливу війни. Сучасні конфлікти спричиняють значні руйнування інфраструктури, що потребує нових підходів до моніторингу та оцінювання пошкоджень. Брак спеціалізованих досліджень у цьому напрямі обмежує можливість ефективного використання технологій для швидкого відновлення та забезпечення безпеки населення в постконфліктний період. Отже, подальші дослідження потрібно зосередити на адаптації існуючих технологій та розробці нових методологій для ефективного моніторингу будівель та інфраструктури в умовах війни і післявоєнного відновлення.

Результати

Узагальнюючи наявні публікації щодо оцінювання руйнувань будівель, спричинених природними та антропогенними чинниками, можемо сказати, що з цієї метою використовуються дані ДЗЗ, отримані або лише після руйнувань (monotemporal або single-temporal methods), або до та після руйнувань (multi-temporal methods). При цьому, необхідно зазначити, що методи, які традиційно використовуються в ДЗЗ для виявлення змін (change detection) за даними, отриманими на різні дати, такі як класифікація з навчанням (наприклад, Belenok et al., 2022) та обчислення вегетаційних індексів (наприклад, Tempa et al., 2024), які базуються на використанні значень спектрального коефіцієнта відбиття у пікселях зображень без урахування просторових властивостей об'єктів (Kitada and Fukuyama, 2012; Tewkesbury et al., 2015), є менш ефективними для аналізу руйнувань та мають обмежену точність. Це пояснюється кількома чинниками. По-перше, пошкоджені та обвалені будівлі мають відносно однорідні спектральні характеристики з неушкодженими будинками,

дорогами та незабудованою землею (Wang and Li, 2015), які, своєю чергою, можуть мати схожий склад (Hu et al., 2008). По-друге, на місці руйнувань утворюються купи уламків та щебеню (Gusella et al., 2005; Нууск et al., 2005), при цьому зруйновані будівлі зі щебенем зазвичай показують значну спектральну мінливість (Liu and Li, 2019). Зауважимо, що цей факт стосується руйнувань внаслідок землетрусів, але у разі військових дій це також може бути, наприклад, при потрапленні снаряда в стіну будівлі та її руйнації або при падінні важкого снаряда (як авіаційна бомба) на дах. По-третє, дахи можуть бути виготовлені з різних матеріалів, що відрізняються спектральним відображенням (Hu et al., 2008), що також необхідно враховувати. Тому деякі автори використовують методи, що враховують крім спектрального коефіцієнта відбиття додаткові характеристики, що дають змогу впевнено відрізнити пошкоджені будинки від інших елементів ландшафту: текстура (Hu et al., 2008; Li, Gong and Zhang, 2018), спектральні особливості (Merlin and Jiji, 2019), просторові характеристики (Guo et al., 2009), морфологічні особливості (Li et al., 2010), висота, отримана у вигляді даних лідара (Hussain et al., 2011; Wang and Li, 2020) або за стереопарами (Turker and Cetinkaya 2005; Tong et al., 2012), інваріантні моменти (Xu and Li, 2010), індекс схожості форми та індекс співвідношення площ (Shi and Hao, 2013), індекс гомогенності на об'єктному рівні (Liu and Li, 2019), оператори Собеля (Liu, Sui and Huang, 2021), Прюїтта (Ye et al., 2015; Ye et al., 2017) та Лапласа (Hordiuk and Hnatushenko, 2017), щільність кутових точок (Wang and Li, 2020), нормалізований різницевий просторовий індекс автокореляції (Blanco, 2022), зміни інтенсивності та когерентності зворотного розсіювання на зображеннях SAR (Aimaiti et al., 2022; Huang et al., 2023; Bachmann-Gigl and Dabiri, 2024) та інших параметрів, які можна знайти в оглядових публікаціях на цю тематику (Dong and Shan, 2013; Gu et al., 2024).

Багато досліджень, присвячених виявленню зруйнованих будівель, базуються на виконанні аналізу зображень на рівні пікселів (Ehrlich et al., 2009; Ye et al., 2017; Li, Gong and Zhang, 2018; Blanco, 2022). Але такий аналіз має низку недоліків, як-от погана ідентифікація меж і локалізації об'єктів, а також наявність так званого ефекту “солі та перцю” (Liu, Sui and Huang, 2021). Kelly et al. (2011) зазначають, що для піксельних методів характерні загальні неточності у разі застосування до знімків високого та надвисокого просторового розрізнення. Townshend et al. (2000), Liu, Guo and Kelly (2008) вказують, що піксельні методи менше придатні для класифікації зазначених знімків. Оскільки об'єкти інтересу на зображенні часто перебувають у діапазоні різних розмірів, форм і часів, жодне просторове розрізнення не є достатнім для того, щоб охопити всі їхні характеристики (Woodcock et al., 1987; Hay, Niemann and Goodenough, 1997), що також є недоліком піксельних методів.

Альтернативою є об'єктний аналіз зображень (Object-Based Image Analysis, OBIA), який дає змогу

характеризувати різні ландшафтні особливості в межах одного зображення, використовуючи різні розміри об'єктів, кожен з яких складається з пікселів з однаковим просторовим розрізненням (Blaschke, 2010). OBIA дає змогу використовувати переваги злиття пікселів і переваги сегментації об'єктів для зменшення кількості оброблюваних одиниць (Li et al., 2011), якими тепер є сегменти зображення, що може мати суттєве значення під час оброблення зображень високого та надвисокого просторового розрізнення на більшій території, таку як територія міста, за допомогою автоматичних та напівавтоматичних методів отримання інформації із зображень. Згідно з (Demharter et al., 2011) для OBIA властива знижена чутливість до факторів перешкод, характерних для піксельних методів, через менший масштаб сегмента, як аналітичної одиниці, порівняно з пікселем.

OBIA включає в себе, як правило, два етапи: 1) виконання сегментації зображення, результатом якої є злиття пікселів у сегменти (суперпікселі) та 2) обчислення різноманітних характеристик зображень об'єктів на основі сегментів, включно зі спектральними характеристиками, текстурними характеристиками, формою, характеристиками їхніх просторових відносин тощо (Hussain et al., 2011; Li et al., 2011; Chen et al., 2012).

Отримані характеристики суперпікселів можуть використовуватись для задачі класифікації пошкоджень як пороговими методами, так і методами машинного навчання, зокрема за допомогою нейронних мереж (Wu et al., 2019).

Для вибору даних ДЗЗ оптичного діапазону та SAR, передусім в контексті оцінювання природних або антропогенних впливів, ключову роль відіграють такі параметри, як просторове розрізнення та спектральний діапазон. Зокрема, просторове розрізнення є одним із найважливіших критеріїв, оскільки саме воно дає змогу чітко ідентифікувати окремі будівлі та точно оцінювати ступінь пошкоджень (Табл. 1).

Таблиця 1. Основні критерії вибору даних ДЗЗ оптичного діапазону та SAR для виявлення пошкоджених будівель

Критерій	Оптичні дані	Дані SAR
Просторове розрізнення	надвисока (до 1 м): WorldView, Pleiades, QuickBird, GeoEye-1; висока (декілька метрів): Planet Scope, RapidEye, IKONOS, SPOT; середня (декілька десятків метрів): Landsat, Sentinel-2, ASTER	надвисока (до 1 м): TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Capella; висока (декілька метрів): Radarsat; середня (декілька десятків метрів): Sentinel-1, SAOCOM, ALOS PALSAR, ERS SAR, ENVISAT ASAR
Спектральний діапазон	Видимий – ближній ІЧ	L-, C-, X-діапазони

Для завдань, що потребують високої деталізації, зокрема, для ідентифікації частин пошкоджених будівель, пробойн у дахах будівель тощо, використовуються зображення з надвисоким просторовим розрізненням (відомі, як very high

resolution images) до 1 м, отримані з комерційних супутників WorldView, Pleiades, QuickBird, GeoEye-1. Для оцінювання руйнувань цілих будинків можна використовувати дані ДЗЗ з високим просторовим розрізненням, що становить декілька метрів – Planet Scope, RapidEye, IKONOS, SPOT. Дані із середнім просторовим розрізненням 10–30 м, наприклад, супутників Sentinel-2 або Landsat, придатні для оцінювання масштабу руйнувань у великих районах, особливо внаслідок природних катастроф, таких як землетруси або повені. Також важливим є вибір спектрального діапазону для даних SAR, оскільки різні частоти забезпечують різну проникність через покриття, такі як ґрунт або рослинність. Наприклад, L-діапазон (1–2 ГГц) може бути використаний для моніторингу будівель під густою рослинністю або для оцінювання пошкоджень від антропогенних впливів, таких як промислові аварії.

Для отримання обох видів даних (оптичних та радарних) використовуються як космічні (супутники, Табл. 1), так і аероплатформи (дрони, літаки), що забезпечує систематичне спостереження та можливість отримувати детальні зображення конкретних будівель або районів (наприклад, Darvishi et al., 2018).

Методи виявлення пошкоджених будівель включають передові технології обробки оптичних і SAR-даних, зокрема алгоритми машинного навчання – методи опорних векторів (SVM) та випадкового лісу (random forest), а також методи глибокого навчання, що базуються на використанні нейронних мереж, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN). CNN широко використовуються для автоматичного виявлення структурних змін – зруйновані дахи або стіни на зображеннях високої роздільної здатності. Ці методи особливо ефективні під час оцінювання наслідків природних катастроф, таких як землетруси або урагани, а також для аналізу антропогенних впливів, таких як вибухи або пожежі в міських районах.

Комбінування даних з різних джерел, таких як оптичні та SAR-зображення, дані висоти (отримані з LIDAR або з оброблення стереопар) та ГІС (Sui et al., 2014), дає змогу підвищити точність виявлення пошкоджених будівель та отримується більш повна картина стану інфраструктури. Зокрема, поєднання оптичних даних Sentinel-2 із SAR-даними Sentinel-1 дає змогу точно ідентифікувати пошкодження навіть в умовах поганої видимості, при хмарності або в нічний час. Такий підхід дає змогу отримати більш детальну оцінку стану будівель та може бути використаний для планування відновлювальних робіт або оцінювання збитків. Методи комбінування даних є критично важливими для моніторингу урбаністичних зон, насамперед у контексті зміни клімату та зростання антропогенного навантаження на інфраструктуру.

Землетрус 2016 року в Кумамото на острові Кюсю, Японія, став наочним прикладом ефективності застосування даних ДЗЗ та радарних технологій SAR для оцінювання та моніторингу пошкоджень будівель в умовах природних катастроф. Значні руйнування інфраструктури, які спостерігалися уздовж активних

розломів Футагава–Хінагу, потребували точного аналізу пошкоджень, що став можливим завдяки використанню високоточних SAR-зображень. Дослідження показало, що коефіцієнт зворотного розсіювання суттєво знижується при великих деформаціях, таких як обвали будівель, тоді як менш серйозні пошкодження, наприклад нахили чи викривлення, менше впливають на цей показник. Це дає змогу чітко розмежувати рівні пошкоджень, що критично важливо для оперативного реагування та оцінювання безпеки будівель. Таким чином, синергія даних ДЗЗ та SAR виявилася високоефективним інструментом для визначення характеру та ступеня руйнувань, даючи змогу точно визначити уразливі ділянки, що також сприяє плануванню подальших заходів з урахуванням геологічних умов місцевості (Cho et al., 2023).

Досвід використання супутникових даних під час воєнних конфліктів також свідчить про їхню цінність для моніторингу та аналізу пошкоджень у зоні бойових дій. Наприклад, під час війни в Південній Осетії у 2008 році виявлено, що коротка тривалість літніх ночей та інтенсивне сонячне випромінювання обмежують можливості нічного супутникового знімання через недостатнє покриття. Проте в інших пори року нічне світло дає змогу майже в реальному часі відстежувати вплив конфліктів, доповнюючи медійні повідомлення про ситуацію на місцях. Окрім того, архівні дані нічних знімків, які доступні з 1992 року, дають змогу проводити аналіз як актуальних, так і минулих конфліктів. Перевагами таких знімків є їх низька вартість, глобальне покриття та регулярне оновлення, завдяки чому можна побудувати повнішу картину просторових і часових наслідків конфлікту. Ініціатива Музею Голокосту США щодо картографування подій у Дарфурі, наприклад, показала ефективність супутникових знімків у документуванні наслідків насильства (Witmer and O'Loughlin, 2011).

У гірських районах руйнівні потоки уламків часто завдають значної шкоди будівлям, тому ідентифікація споруд у зоні ризику є важливою для управління ризиками в населених пунктах. Wei, Hu and Liu (2022) запропонували метод, що поєднує ГІС та мережу глибокого кодування (DE-Net) та дає змогу автоматично визначати будівлі, схильні до потоків уламків, за допомогою цифрових даних рельєфу та супутникових зображень. Критерії оцінювання базуються на матриці вразливості з урахуванням горизонтальної та вертикальної відстаней між будівлями і потоками, що визначено на основі аналізу зруйнованих 362 будівель і даних про максимальні глибини потоків з 26 подій. Дослідження в повіті Пуге, Сичуань, показало ефективність цього методу для визначення зон ризику, що допомагає місцевій владі розробляти цільові заходи на етапі планування забудови.

Досвід аналізу нічного освітлення на території Іраку за період 2012–2017 років за допомогою зображень VIIRS показав можливість оцінювання соціально-економічного стану в умовах конфлікту. З аналізу зображень нічного освітлення провінцій та міст Північного і Південного Іраку було виявлено

динамічні зміни в освітленості: різке зниження світла в північних регіонах через вторгнення ІДІЛ у 2014 році, поступове відновлення після повернення контролю урядовими силами та спад освітленості в Курдському автономному регіоні через економічну кризу. Тоді як у південних регіонах спостерігалось стабільне зростання освітленості, що свідчить про їх відносний розвиток. Цей аналіз дав змогу отримати нові відомості щодо наслідків громадянської війни в Іраку (Li et al., 2018).

В Україні велика кількість будівель була пошкоджена внаслідок військових дій. Умови війни створюють особливі виклики для збору та аналізу даних, зокрема через наявність диму, руйнування інфраструктури та обмежений доступ до місць подій. SAR-дані, особливо в L-діапазоні, дають змогу отримувати зображення навіть у складних умовах, таких як хмарність або нічний час, що забезпечує безперервний моніторинг стану інфраструктури (Li et al., 2019).

Для ефективного аналізу використовуються різні алгоритми машинного та глибокого навчання, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), які здатні ідентифікувати пошкоджені будівлі з високою точністю. CNN використовуються для автоматичного розпізнавання структурних змін, таких як руйнування стін або дахів, що є характерними ознаками пошкоджень у міських та сільських зонах. Ці методи дають змогу не тільки виявляти факт наявності пошкоджень, а й оцінювати їх ступінь, що важливо для планування відновлювальних робіт (Aimaiti et al., 2022; Wu et al., 2019).

Процес виявлення порушених будівель включає кілька етапів, починаючи з попереднього оброблення даних для корекції геометричних та радіометричних спотворень. Далі застосовуються алгоритми сегментації для виділення окремих об'єктів на зображеннях. Після цього використовуються методи класифікації, зокрема CNN, для визначення ступеня пошкодження будівель. Характеристика порушених будівель дається на основі аналізу змін у текстурі та структурі будівельних матеріалів, що дає змогу диференціювати між частково та повністю зруйнованими об'єктами.

Порівняно з традиційними наземними обстеженнями та фотографічними даними, SAR-дані є більш ефективними завдяки своїй здатності проникати через дим, хмари та є особливо корисними в умовах активних бойових дій, де доступ до наземних спостережень обмежений. Однак, в деяких випадках SAR-дані можуть поступатися в деталізації оптичним знімкам з високою роздільною здатністю, що використовуються для ідентифікації дрібних структурних пошкоджень. Таким чином, комбінування оптичних і SAR-даних дає змогу досягти повнішого та точнішого аналізу стану будівель (Табл. 2).

Таблиця 2. Порівняння методів виявлення пошкоджених будівель

Метод	Переваги	Недоліки
Оптичні дані	Висока деталізація, кольорова інформація	Чутливість до погодних умов, дим

Метод	Переваги	Недоліки
SAR-дані	Проникність через хмари та дим	Менша деталізація, можливі спотворення
Наземні обстеження	Точність, детальний аналіз	Висока вартість, небезпека в зонах конфлікту

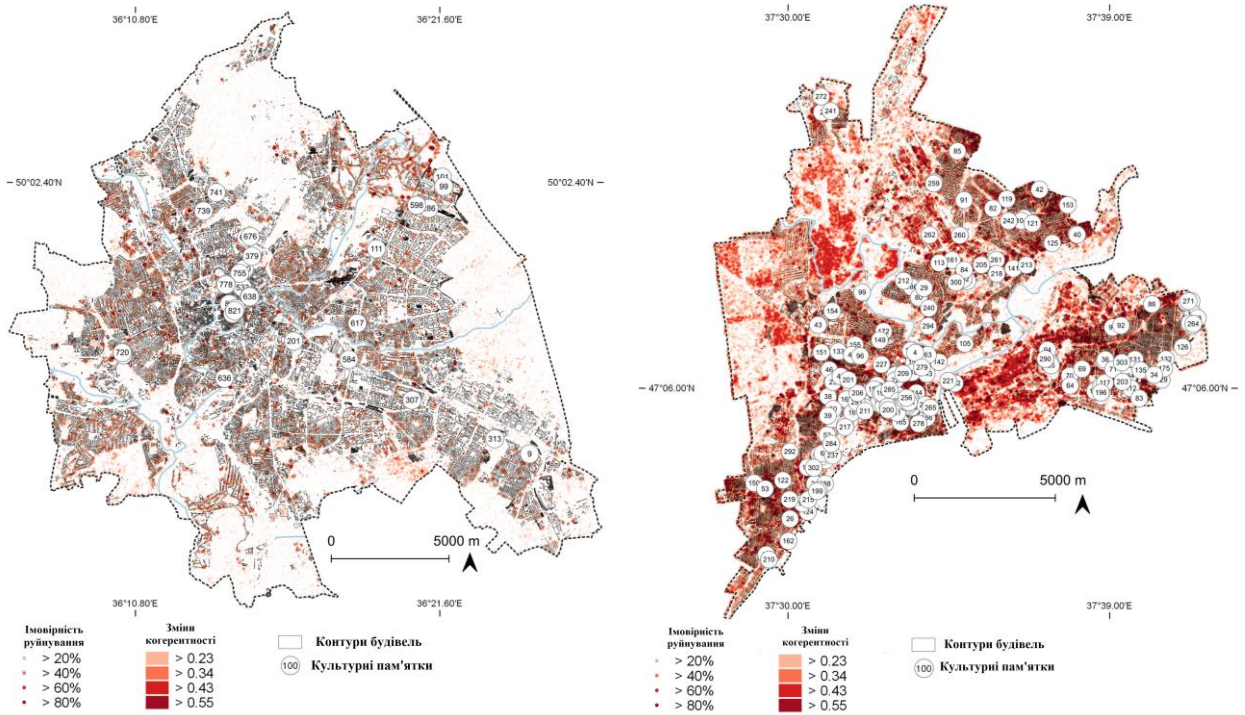
Розглянемо вже існуючі роботи з оцінювання руйнувань будівель внаслідок російсько-української війни.

Місто Маріуполь зазнало масштабних руйнувань під час конфлікту між Росією та Україною. Використовуючи дані Landsat-8/9, Sentinel-1/2, а також доступну інформацію з відкритих інтернет-джерел, вдалося здійснити моніторинг тимчасових і просторових змін у зонах згорілих територій та пошкоджених будівель. Розроблений авторами (Huang et al., 2023) метод IFB-CEM показав відмінні результати у виявленні зон згорілих будівель. За допомогою статистичного аналізу було встановлено, що інтенсивність бойових дій досягла свого піку в третю декаду березня 2022 року. Просторовий ріст кількості пошкоджених будівель корелював з перебігом конфлікту. До моменту повного захоплення Маріуполя російськими військовими наприкінці травня 2022 року майже всі будівлі в місті були зруйновані або серйозно пошкоджені, а кумулятивний відсоток таких споруд становив 79,2%.

Bachmann-Gigl and Dabiri (2024) виконали аналіз часових рядів когерентності за даними Sentinel-1 з метою виявлення руйнувань на території Харкова та Маріуполя. Окремо розглядалося виявлення пошкоджених пам'яток історії та культури, дані про місцезнаходження яких були отримані з OSM. Для валідації отриманих результатів використовувалася база даних UNOSAT (the United Nations Satellite Center). На Рис. 1 наведено відповідні карти пошкоджень Харкова (а) та Маріуполя (б) за період з лютого по травень 2022 року. Прогнозована ймовірність пошкоджень >20 % візуалізована на основі центроїдів будівель. Пронумеровані мітки позначають пошкоджені культурні пам'ятки.

Aimaiti et al. (2022) оцінили руйнування в Києві та його північно-західних околицях, використовуючи комбінування даних SAR Sentinel-1 та даних оптичного діапазону Sentinel-2. Для виявлення руйнувань автори застосували методи обчислення логарифму співвідношення інтенсивності та текстури (за матрицею GLCM – grey level co-occurrence matrix) (Рис. 2).

Наведені методи, зокрема використання SAR, показали свою особливу ефективність в умовах, коли оптичні методи обмежені через погодні умови або дим. Однак, оптичні дані надають додаткову деталізацію, що дозволяє краще зрозуміти структуру пошкоджень. Такий підхід до комбінування різних типів даних забезпечує більш точну оцінку пошкоджень, що є критично важливим для оперативного реагування та відновлення інфраструктури після воєнних дій.



а – Харків (попикселна зміна когерентності з 09.02.2022 р. – 21.02.2022 р. до 21.02.2022 р. – 28.05.2022 р. зафарбована відповідно до порогів імовірності)
 б – Маріуполь (попикселна зміна когерентності з 04.02.2022 р. – 16.02.2022 р. до 16.02.2022 р. – 23.05.2022 р. зафарбована відповідно до порогів імовірності)

Рис. 1. Карта пошкоджень за період з лютого по травень 2022 р., отримана Vachmann-Gigl and Dabiri (2024)

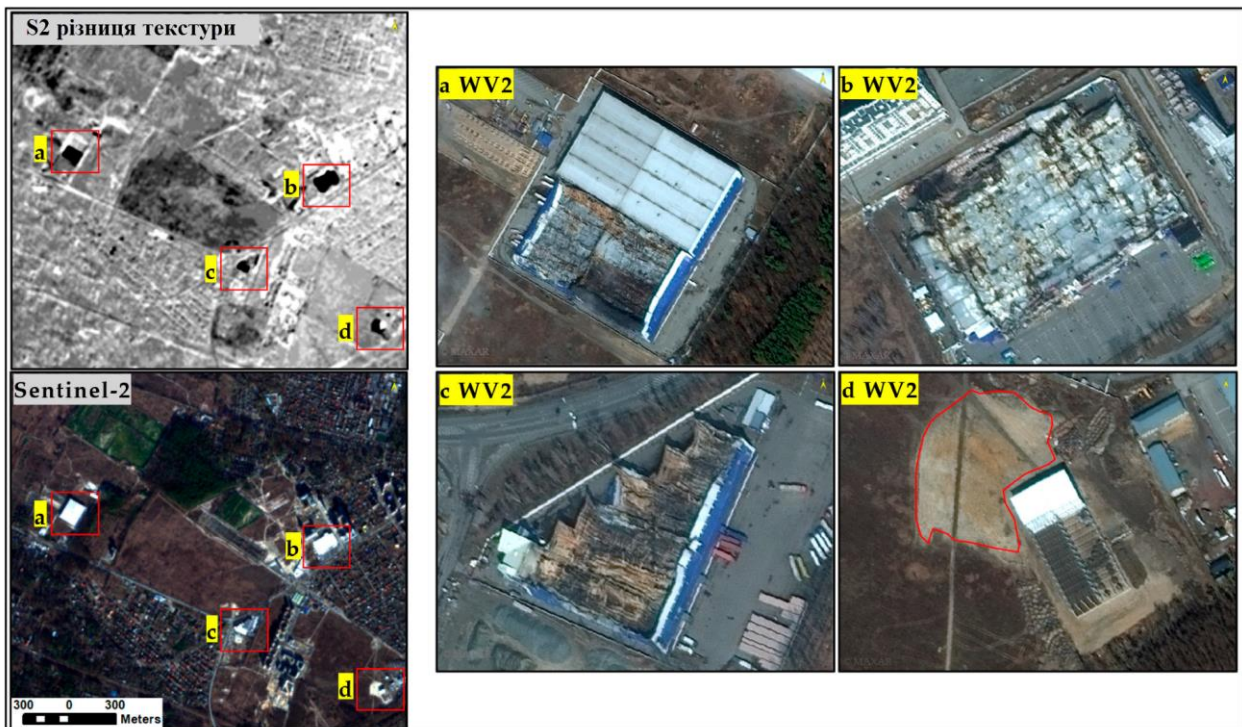


Рис. 2. Різниця текстур GLCM та відповідні оптичні зображення.

На рис. а–d у стовпчику ліворуч показано окремі ділянки зі значними змінами текстури, а праворуч наведено їх місцезоналення на зображенні WorldView-2 (Aimaiti et al., 2022)

Отже, використання даних ДЗЗ оптичного діапазону і SAR має значні переваги у контексті оцінювання пошкоджень інфраструктури, насамперед в умовах військових конфліктів. Основною перевагою SAR-даних є їх здатність забезпечувати зображення незалежно від погодних

умов, освітленості та наявності диму, що робить їх незамінними для швидкого оцінювання ситуації на місцях конфліктів. Це дає змогу оперативно ідентифікувати пошкодження будівель, таких як руйнування стін або дахів, що критично важливо для планування відновлювальних робіт. Дані ДЗЗ,

зокрема оптичні зображення надвисокої роздільної здатності дають змогу отримувати детальні кольорові зображення і аналізувати текстури для точнішої оцінки характеру пошкоджень.

Однак, існують і обмеження цих методів. SAR-дані можуть бути менш точними у визначенні дрібних структурних пошкоджень, передусім у густо забудованих або складних урбаністичних середовищах. Інтерпретаційні можливості даних ДЗЗ оптичного діапазону високого просторового розрізнення можуть бути обмежені хмарністю або димом, що ускладнює отримання якісних зображень. Крім того, висока вартість комерційних супутникових даних і необхідність спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу можуть стати бар'єром для широкого використання цих технологій.

Для удосконалення методів оцінювання пошкоджень будівель можна запропонувати кілька підходів. По-перше, інтеграція даних з різних типів сенсорів, таких як оптичні, інфрачервоні та SAR, може забезпечити повнішу картину пошкоджень, від структурних до теплових аномалій. По-друге, розвиток методів машинного навчання, зокрема глибокого навчання, може покращити точність автоматичного виявлення і класифікації пошкоджень (Kozlova and Velikodsky, 2024). По-третє, використання даних надвисокого просторового розрізнення супутників нового покоління, таких як WorldView-3 або Pleiades, може забезпечити ще більшу деталізацію зображень, що важливо для точного аналізу (Табл. 3).

Таблиця 3. Переваги, обмеження та можливості удосконалення методів ДЗЗ за допомогою даних оптичного діапазону і SAR

Критерій	Переваги	Обмеження	Можливості вдосконалення
SAR-дані	Незалежність від погодних умов, нічний режим	Менша деталізація, можливі спотворення	Інтеграція з іншими типами сенсорів, використання AI для обробки
Оптичні дані	Висока деталізація, кольорова інформація	Чутливість до погодних умов, хмарність	Впровадження мультиспектрального аналізу, використання високороздільних супутників
Інтеграція даних	Більш повна картина, різні аспекти пошкоджень	Вартість, необхідність спеціалізованого ПО	Розвиток хмарних обчислень, покращення доступності даних
Машинне та глибоке навчання	Автоматичне виявлення і класифікація пошкоджень	Потребує великої кількості навчальних даних	Розробка глибоких нейронних мереж, використання розширеного набору навчальних даних

Вищезазначені системи та методи мають великий потенціал практичного використання, насамперед у контексті оцінювання збитків після природних

катастроф або військових дій. В Україні, наприклад, ці методи можуть бути використані для швидкого оцінювання пошкоджень будівель після обстрілів, що дасть змогу ефективніше планувати відновлювальні роботи та забезпечувати оперативну допомогу постраждалим регіонам. Крім того, ці системи можна використати для довгострокового моніторингу стану інфраструктури, що дасть змогу своєчасно виявити та розв'язати проблеми, запобігаючи їх загостренню.

Висновки

Використання оптичних даних ДЗЗ та радіолокаційних даних SAR є ключовим інструментом для оцінювання пошкоджень будівель та інфраструктури в умовах воєнних конфліктів і природних катастроф. Ці технології забезпечують надійну інформацію про стан об'єктів, що особливо важливо в сучасному контексті, коли зростає потреба у швидкому реагуванні та точному оцінюванні руйнувань, зокрема, під час війни в Україні. Завдяки SAR-технології можна отримувати дані незалежно від часу доби та погодних умов. Це дає змогу безперервно контролювати території, навіть в умовах густих хмар або сильного задимлення, що неможливо за допомогою оптичних засобів. Оптичні дані, своєю чергою, забезпечують високе просторове розрізнення, надаючи змогу визначити не тільки форму та розміри пошкоджень, а й текстуру та колір поверхонь, що критично важливо для деталізації характеру руйнувань.

Водночас, ці методи мають певні обмеження. Наприклад, SAR-дані мають обмежену здатність ідентифікувати дрібні структурні пошкодження через специфічність радіолокаційних сигналів, які можуть спотворюватися в умовах щільної забудови чи на складних рельєфах. Аналогічно, оптичні дані можуть бути малоінформативними у випадках зруйнованих об'єктів, які втратили візуально розпізнавані ознаки. Іншим значним фактором є вартість супутникових знімків високої якості, яка може бути стримувальним чинником при великих обсягах даних, потрібних для повного охоплення зони бойових дій чи масштабних катастроф. Окрім того, обробка таких даних потребує спеціалізованого програмного забезпечення та відповідної кваліфікації спеціалістів, що збільшує витрати на впровадження таких методів у державні чи комерційні структури.

Для вдосконалення ефективності цих технологій перспективним напрямом є інтеграція даних з різних типів сенсорів, що може забезпечити більш комплексну та достовірну інформацію про стан об'єктів. Наприклад, поєднання SAR-даних з оптичними високого просторового розрізнення дає змогу поєднати переваги обох методів, забезпечуючи повноцінне картографування руйнувань і поліпшення якості оцінювання збитків. Іншим перспективним напрямом є використання методів машинного та глибокого навчання для автоматичного аналізу пошкоджень на основі великих обсягів даних. Такі алгоритми дають змогу

автоматизувати і прискорити процес аналізу супутникових зображень, виділяючи пошкоджені об'єкти та класифікуючи їх за ступенем руйнування. Використання даних надвисокого просторового розрізнення супутників нового покоління є ще одним напрямом для підвищення якості збору даних, оскільки нові супутникові платформи надають більшу деталізацію знімків і можуть здійснювати знімання з частотою, що дає змогу постійно моніторити зони підвищеної небезпеки.

Практичне застосування цих методів є багатоаспектним. Вони вже сьогодні широко використовуються для оцінювання збитків після природних катастроф, таких як землетруси, повені чи лісові пожежі, а також під час воєнних конфліктів для документування руйнувань і планування відновлювальних робіт. Крім того, такі системи можуть бути інтегровані у довгострокові стратегії моніторингу інфраструктури для контролю стану об'єктів і швидкого виявлення нових пошкоджень. Це дає змогу не лише прискорити процес відновлення пошкодженої інфраструктури, а й ефективно управляти кризовими ситуаціями, забезпечуючи збереження життя та безпеку громадян. Такий підхід, що базується на застосуванні новітніх технологій ДЗЗ та машинного навчання, забезпечує державним та міжнародним організаціям нові можливості для оперативного реагування, комплексного моніторингу і планування у критичних умовах.

Author Contributions: Conceptualization, Skrypnik L. and Velikodsky Yu.; methodology, Skrypnik L., Velikodsky Yu., Belenok V.; formal analysis, Velikodsky Yu.; investigation, Ishchenko N. and Klymenko O.; data curation, Belenok V. and Velikodsky Yu.; writing – original draft preparation, Skrypnik L.; writing – review and editing, Belenok V. and Velikodsky Yu.; visualization, Ishchenko N. and Klymenko O. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The study was carried out as part of the research project "Development of an intelligent object recognition system for the identification of buildings damaged as a result of military operations" (Ministry of Education and Science of Ukraine, state registration number 0124U000220).

The authors would like to express their sincere gratitude to the Earth Observing System Data Analytics company (eosda.com) for support. We are also grateful to reviewers and editors for their valuable comments, recommendations, and attention to the work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Внесок авторів: Концептуалізація – Скрипник Л.Р. та Великодський Ю.І.; методологія – Скрипник Л.Р., Беленок В.Ю. та Великодський Ю.І.; формальний аналіз – Великодський Ю.І.; дослідження – Іщенко Н.Ф. та Клименко О.О.; обробка даних – Беленок В.Ю. та Великодський Ю.І.; написання – підготовка оригінального тексту – Скрипник Л.Р.; написання – рецензування та редагування – Беленок В.Ю. та Великодський Ю.І.; візуалізація – Іщенко Н.Ф. та Клименко О.О. Всі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Фінансування: Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Доступність даних: Не застосовується.

Подяки: Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи "Розробка інтелектуальної системи розпізнавання об'єктів для ідентифікації забудови, пошкодженої внаслідок воєнних дій" (Міністерство освіти і науки України, державний реєстраційний номер 0124U000220).

Автори висловлюють щирю подяку компанії Earth Observing System Data Analytics (eosda.com) за підтримку. Також вдячні рецензентам та редакторам за цінні коментарі, рекомендації та увагу до роботи.

Конфлікти інтересів: Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

References

- Aimaiti, Y., Sanon, C., Koch, M., Baise, L. G., & Moaveni, B. (2022). War-related building damage assessment in Kyiv, Ukraine, using Sentinel-1 radar and Sentinel-2 optical images. *Remote Sensing*, 14(24), 6239. <https://doi.org/10.3390/rs14246239>.
- Amitrano, D., Di Martino, G., Guida, R., Iervolino, P., Iodice, A., Papa, M. N., Riccio, D., & Ruello, G. (2021). Earth environmental monitoring using multi-temporal synthetic aperture radar: A critical review of selected applications. *Remote Sensing*, 13(4), 604. <https://doi.org/10.3390/rs13040604>.
- Bachmann-Gigl, U., Dabiri, Z. (2024). Cultural Heritage in Times of Crisis: Damage Assessment in Urban Areas of Ukraine Using Sentinel-1 SAR Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(9), 319. <https://doi.org/10.3390/ijgi13090319>.
- Belenok, V., Hebryn-Baidy, L., Bielousova, N., Zavarika, H., Sakal, O., & Kovalenko, A. (2022). Geoinformation mapping of anthropogenically transformed landscapes of Bila Tserkva (Ukraine). *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus*, 21(1), 69–84. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2022.21.1.69>.
- Blanco, A. C. (2022). Typhoon damage mapping using normalized differenced spatial autocorrelation and Planetscope image. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, 43(B3-2022), 1077–1082. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-1077-2022>.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2–16. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>.
- Bloorani, A. D., Darvishi, M., Weng, Q., & Liu, X. (2021). Post-war urban damage mapping using InSAR: The case of Mosul city in Iraq. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 140. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030140>.
- Chen, F., Guo, H., Tapete, D., Cigna, F., Piro, S., Lasaponara, R., & Masini, N. (2022). The role of imaging radar in cultural heritage: From technologies to applications. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102907>.
- Chen, G., Hay, G. J., Carvalho, L. M. T., Wulder, M. A. (2012). Object-based change detection. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (14), 4434–4457. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.648285>.
- Cho, S., Xiu, H., Matsuoka, M. (2023). Backscattering characteristics of SAR images in damaged buildings due to the 2016 Kumamoto earthquake. *Remote Sensing*, 15(8), 2181. <https://doi.org/10.3390/rs15082181>.

- Darvishi, M., Schlögel, R., Kofler, C., Cuozzo, G., Rutzinger, M., Zieher, T., ... Bruzzone, L. (2018). Sentinel-1 and ground-based sensors for continuous monitoring of the Corvara landslide (South Tyrol, Italy). *Remote Sensing*, 10(11), 1781. <https://doi.org/10.3390/rs10111781>.
- Demharter, T., Michel, U., Ehlers, M., Reinartz, P. (2011). Object-based change detection: Dimension of damage in residential areas of Abu Suruj, Sudan. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 8181, 81811J. <https://doi.org/10.1117/12.897589>.
- Dong, L., Shan, J. (2013). A comprehensive review of earthquake-induced building damage detection with remote sensing techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 84, 85–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.06.011>.
- Ehrlich, D., Guo, H. D., Molch, K., Ma, J. W., Pesaresi, M. (2009). Identifying damage caused by the 2008 wenchuan earthquake from VHR remote sensing data. *International Journal of Digital Earth*, 2(4), 309–326. <https://doi.org/10.1080/17538940902767401>.
- Gu, J., Xie, Z., Zhang, J., He, X. (2024). Advances in Rapid Damage Identification Methods for Post-Disaster Regional Buildings Based on Remote Sensing Images: A Survey. *Buildings*, 14(4), 898. <https://doi.org/10.3390/buildings14040898>.
- Guo, H. D., Lu, L. L., Ma, J. W., Pesaresi, M., Yuan, F. Y. (2009). An improved automatic detection method for earthquake-collapsed buildings from ADS40 image. *Chinese Science Bulletin*, 54(18), 3303–3307. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0461-3>.
- Gusella, L., Adams, B. J., Bitelli, G., Huyck, C. K., Mognol, A. (2005). Object-oriented image understanding and post-earthquake damage assessment for the 2003 Bam, Iran, earthquake. *Earthquake Spectra*, 21 (SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1193/1.2098629>.
- Hay, G. J., Niemann, K. O., Goodenough, D. G. (1997). Spatial thresholds, image-objects and upscaling: a multiscale evaluation. *Remote Sensing of Environment*, 62, 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)81622-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)81622-7).
- He, Z., Yang, Z., Wu, X., Zhang, T., Song, M., & Liu, M. (2024). Triggering of land subsidence in and surrounding the Hangjiahu Plain based on interferometric synthetic aperture radar monitoring. *Remote Sensing*, 16(11), 1864. <https://doi.org/10.3390/rs16111864>.
- Hordiuk, D. M., Hnatushenko, V. V. (2017). Neural network and local laplace filter methods applied to very high resolution remote sensing imagery in urban damage detection. In *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, pp. 363–366. <https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126648>.
- Hu, D.-Y., Li, X.-J., Zhao, W.-J., Gong, H.-L. (2008). Texture analysis and its application for single-band SAR thematic information extraction. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2(1), 4779149. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779149>.
- Huang, Q., Jin, G., Xiong, X., Ye, H., Xie, Y. (2023). Monitoring urban change in conflict from the perspective of optical and SAR satellites: The case of Mariupol, a city in the conflict between Russia and Ukraine. *Remote Sensing*, 15(12), 3096. <https://doi.org/10.3390/rs15123096>.
- Hussain, E., Ural, S., Kim, K., Fu, C.-S., Shan, J. (2011). Building extraction and rubble mapping for city Port-au-Prince post-2010 earthquake with GeoEye-1 imagery and Lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 77(10), 1011–1023. <https://doi.org/10.14358/PERS.77.10.1011>.
- Huyck, C. K., Adams, B. J., Cho, S., Chung, H.-C., Eguchi, R. T. (2005). Towards Rapid Citywide Damage Mapping Using Neighborhood Edge Dissimilarities in Very High-Resolution Optical Satellite Imagery—Application to the 2003 Bam, Iran, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 21 (SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1193/1.2101907>.
- Kelly, M., Blanchard, S. D., Kersten, E., Koy, K. (2011). Terrestrial remotely sensed imagery in support of public health: New avenues of research using object-based image analysis. *Remote Sensing*, 3(11), 2321–2345. <https://doi.org/10.3390/rs3112321>.
- Kim, M., Park, S.-E., Lee, S.-J. (2023). Detection of damaged buildings using temporal SAR data with different observation modes. *Remote Sensing*, 15(2), 308. <https://doi.org/10.3390/rs15020308>.
- Kitada, K., Fukuyama, K. (2012). Land-use and land-cover mapping using a gradable classification method. *Remote Sensing*, 4(6), 1544–1558. <https://doi.org/10.3390/rs4061544>.
- Kozlova, T., Velikodsky, Y. (2024). Deep Learning-Based Detection of Damaged Buildings in Satellite Imagery. In *International Conference of Young Professionals “GeoTerrace-2024”*, Vol. 2024, No. 1, GeoTerrace-2024-013. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Li, Q., Gong, L., Zhang, J. (2018). Earthquake-induced building recognition using correlation change detection of texture features based on SAR data. *Geodetski List*, 72(2), 93–112.
- Li, Q., Gong, L., Zhang, J. (2019). A correlation change detection method integrating PCA and multi-texture features of SAR image for building damage detection. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 435–447. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1630322>.
- Li, X., Liu, S., Jendryke, M., Li, D., Wu, C. (2018). Night-time light dynamics during the Iraqi civil war. *Remote Sensing*, 10(6), 858. <https://doi.org/10.3390/rs10060858>.
- Li, X., Yang, W., Ao, T., Li, H., Chen, W. (2011). An improved approach of information extraction for earthquake-damaged buildings using high-resolution imagery. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 5(4), 389–399. <https://doi.org/10.1142/S1793431111001157>.
- Li, Y., Hu, W., Dong, H., Zhang, X. (2019). Building damage detection from post-event aerial imagery using single shot multibox detector. *Applied Sciences*, 9(6), 1128. <https://doi.org/10.3390/app9061128>.
- Li, Z., Ma, J., Zhang, R., Li, L. (2010). Extracting damaged buildings information automatically based on textural and morphological features. *Wuhan Daxue Xuebao (Xinxi Kexue Ban), Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 35(4), 446–450.
- Lin, Y., Wang, Y., Shen, W., Bai, Z. (2024). Innovative rotating SAR mode for 3D imaging of buildings. *Remote Sensing*, 16(12), 2251. <https://doi.org/10.3390/rs16122251>.
- Liu, C., Sui, H., Huang, L. (2021). Identification of Damaged Building Regions from High-Resolution Images Using Superpixel-Based Gradient and Autocorrelation Analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 1010–1024. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3034378>.
- Liu, J., Li, P. (2019). Extraction of Earthquake-Induced Collapsed Buildings From Bi-Temporal VHR Images Using Object-Level Homogeneity Index and Histogram. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(8), 8692722. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2904670>.
- Liu, N., Li, X., Hong, W., Li, F., Wu, W. (2024). Individual high-rise building extraction from single high-resolution SAR image based on part model. *Remote Sensing*, 16(7), 1278. <https://doi.org/10.3390/rs16071278>.
- Liu, Y., Guo, Q., Kelly, M. (2008). A framework of region-based spatial relations for non-overlapping features and its application in object based image analysis. *ISPRS Journal*

- of *Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(4), 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.01.007>.
- Merlin, G. S., Jiji, G. W. (2019). Building Damage Detection of the 2004 Nagapattinam, India, Tsunami Using the Texture and Spectral Features from IKONOS Images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(1), 13–24. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0858-z>.
- Rao, A., Jung, J., Silva, V., Molinario, G., Yun, S.-H. (2023). Earthquake building damage detection based on synthetic-aperture-radar imagery and machine learning. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23, 789–807. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-789-2023>.
- Shi, W., Hao, M. (2013). A method to detect earthquake-collapsed buildings from high-resolution satellite images. *Remote Sensing Letters*, 4(12), 1166–1175. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.858839>.
- Sui, H., Tu, J., Song, Z., Chen, G., Li, Q. (2014). A novel 3D building damage detection method using multiple overlapping UAV images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, 40(7), 173–179. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-173-2014>.
- Tempa, K., Ilunga, M., Agarwal, A., Tashi. (2024). Utilizing Sentinel-2 Satellite Imagery for LULC and NDVI Change Dynamics for Gelephu, Bhutan. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(4), 1578. <https://doi.org/10.3390/app14041578>.
- Tewkesbury, A. P., Comber, A. J., Tate, N. J., Lamb, A., & Fisher, P. F. (2015). A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques. *Remote Sensing of Environment*, 160, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.006>.
- Tong, X., Hong, Z., Liu, S., Zhang, X., Xie, H., Li, Z., Yang, S., Wang, W., & Bao, F. (2012). Building-damage detection using pre- and post-seismic high-resolution satellite stereo imagery: a case study of the May 2008 Wenchuan earthquake. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68(1), 13–27. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.12.004>.
- Townshend, J. R. G., Huang, C., Kalluri, S. N. V., Defries, R. S., Liang, S., & Yang, K. (2000). Beware of per-pixel characterization of land cover. *International Journal of Remote Sensing*, 21(4), 839–843. <https://doi.org/10.1080/014311600210641>.
- Turker, M., Cetinkaya, B. (2005). Automatic detection of earthquake-damaged buildings using DEMs created from pre- and post-earthquake stereo aerial photographs. *International Journal of Remote Sensing*, 26(4), 823–832. <https://doi.org/10.1080/01431160512331316810>.
- Volosyuk, V. K., Zhyla, S. S., Ruzhentsev, M. V., Sobkolov, A. D., Tserne, E. O., Kolesnikov, D. V., Vlasenko, D. S., & Topal, M. S. (2020). Radar cross-section imaging in synthetic aperture radar with linear antenna array and adaptive receiver. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (3), 7–21. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-3-1>.
- Wang, X., Li, P. (2020). Extraction of urban building damage using spectral, height and corner information from VHR satellite images and airborne LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 322–336. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.028>.
- Wang, X., Li, P. 2015. Extraction of earthquake-induced collapsed buildings using very high-resolution imagery and airborne lidar data. *International Journal of Remote Sensing*, 36(8), 2163–2183. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1034890>.
- Wei, L., Hu, K., Liu, J. (2022). Automatic identification of buildings vulnerable to debris flows in Sichuan Province, China, by GIS analysis and deep encoding network methods. *Journal of Flood Risk Management*, 15(4), e12830. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12830>.
- Witmer, F. D. W., O'Loughlin, J. (2011). Detecting the effects of wars in the Caucasus regions of Russia and Georgia using radiometrically normalized DMSP-OLS nighttime lights imagery. *GIScience & Remote Sensing*, 48(4), 478–500. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.48.4.478>.
- Woodcock, C. E., Strahler, A. H. (1987). The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 21, 311–332. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(87\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90015-0).
- Wu, M., Zhao, X., Sun, Z., Guo, H. (2019). A hierarchical multiscale super-pixel-based classification method for extracting urban impervious surface using deep residual network from WorldView-2 and LiDAR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(1), 210–222. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2886288>.
- Xu, H., Li, P. (2010). Urban land cover classification from very high resolution imagery using spectral and invariant moment shape information. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(3), 248–260. <https://doi.org/10.5589/m10-042>.
- Xu, H., Barbot, S., Wang, T. (2024). Remote sensing through the fog of war: Infrastructure damage and environmental change during the Russian-Ukrainian conflict revealed by open-access data. *Natural Hazards Research*, 4, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.006>.
- Yang, X., Shi, J., Zhou, Y., Wang, C., Hu, Y., Zhang, X., & Wei, S. (2020). Ground moving target tracking and refocusing using shadow in video-SAR. *Remote Sensing*, 12(18), 3083. <https://doi.org/10.3390/rs12183083>.
- Ye, X., Liu, M., Wang, J., Qin, Q., Ren, H., Wang, J., & Hui, J. (2017). Building-Based Damage Detection from Postquake Image Using Multiple-Feature Analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(4), 499–503, 7840027. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2651050>.
- Ye, X., Qin, Q., Wang, J., Wang, J., Yang, X., & Qin, X. (2015). Detecting damaged buildings caused by earthquake using local gradient orientation entropy statistics method. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015-November, 3568–3571, 7326592. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326592>.
- Yu, S. W., Xu, B. Y., Tao, W. Z. (2022). Coastline detection using optical and synthetic aperture radar images. *Advances in Space Research*, 70(1), 70–84. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117722002939/>
- Zhang, K., Fu, X., Lv, X., Yuan, J. (2021). Unsupervised multitemporal building change detection framework based on cosegmentation using time-series SAR. *Remote Sensing*, 13(3), 471. <https://doi.org/10.3390/rs13030471>.

JUSTIFICATION OF THE ADVANTAGES OF USING OPTICAL AND RADAR REMOTE SENSING DATA IN DETECTING BUILDINGS DAMAGED BY NATURAL OR ANTHROPOGENIC IMPACTS

L. R. Skrypnyk, V. Yu. Belenok, Yu. I. Velikodsky, N. F. Ishchenko, O. O. Klymenko
State University "Kyiv Aviation Institute", Lubomyr Husar Ave. 1, Kyiv 03058, Ukraine

The review examines the advantages and possibilities of using remote sensing data to detect and assess damaged buildings, especially in conditions of natural or anthropogenic impact, such as military operations. The main objective of the study was to substantiate the effectiveness of an integrated approach to monitoring and assessing the condition of buildings using remote sensing methods with

optical and radar data, in particular in the context of war. This combination allowed for a comprehensive assessment of the objects' condition, which turned out to be necessary for making informed decisions in crisis situations. The study emphasized the importance of rapid and accurate assessment of the condition of buildings and infrastructure, which was critical for ensuring the safety of the population. Such assessments contributed to the planning of evacuation routes, the organization of temporary housing and the coordination of restoration work. SAR (Synthetic Aperture Radar) technologies provide high-quality radar images regardless of the time of day and weather conditions, which is especially useful in conditions of limited access to affected areas due to hostilities or natural disasters. Optical data provide additional information about the damage and allow for a more accurate assessment of the extent of destruction.

The article also compares the methods used in various studies to assess the destruction of buildings caused by factors of anthropogenic or natural origin. It is established that for this purpose, methods are used that are based either on remote sensing data before and after the destruction (multi-temporal methods) or only on data after the destruction (mono-temporal methods). In this case, optical remote sensing data, radar data, height data (LIDAR, stereo pairs of aerial photographs or satellite data of ultra-high spatial resolution) and GIS are usually used, as well as data combination. This allowed to increase the reliability of detecting destroyed buildings and assess the extent of destruction, and to adapt remote sensing methods to various emergency scenarios.

The conclusions of the article emphasize the importance of integrating different types of data and developing machine learning methods to increase the accuracy of the analysis. Practical applications of the described methods included damage assessment after natural disasters or military operations, which allowed for effective planning of recovery efforts and ensuring the safety of citizens. Such capabilities were critically important for crisis management and ensuring the stability of infrastructure in affected regions. Integration of optical and SAR remote sensing data is a powerful tool for rapid response and long-term monitoring, providing support for public safety and recovery planning in crisis situations.

Keywords: remote monitoring technologies, remote damage assessment, radar sensing, recovery measures, urban infrastructure analysis, structural damage, risk prediction

*Рукопис статті отримано 10.12.2024
Надходження остаточної версії: 17.12.2024
Публікація статті: 30.12.2024*