

УДК 528.8:528.48
UDC 528.8:528.48

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-266-278

**ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ
МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМЕЛЬ У ЗОНАХ БОЙОВИХ ДІЙ: МЕТОДОЛОГІЧНІ
ЗАСАДИ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ**

**APPLICATION OF REMOTE SENSING INTERFEROMETRY TO MONITOR LAND
DEFORMATIONS IN COMBAT ZONES: METHODOLOGICAL PRINCIPLES AND APPLIED
ASPECTS**



Сербов Микола Георгійович, доктор економічних наук, професор, декан факультету гідрометеорології і екології, Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Одеса, Україна, e-mail: serbovng@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-0220-6745>



Данілова Наталія Василівна, кандидат географічних наук, старший викладач кафедри агрометеорології та агроєкології, Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Одеса, Україна, e-mail: nataliadanilova0212@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-2334-6058>



Пилип'юк Віктор Вікторович, кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри гідрології суші, Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Одеса, Україна, e-mail: pilipukvv@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-0365-4275>

Анотація: Стаття присвячена дослідженню можливостей застосування супутникової інтерферометрії (InSAR) для оцінки деформацій земної поверхні в зонах бойових дій. Збройні конфлікти та бойові дії спричиняють зміни ландшафту та викликають значні деформації земної поверхні. В умовах, де традиційні методи моніторингу є небезпечними або неможливими, дистанційні підходи набувають особливого значення. Ефективним інструментом для виявлення деформації земної поверхні є супутникова інтерферометрія, яка базується на аналізі фазових різниць між двома або більше радарними зображеннями, отриманими з однієї або подібних орбіт у різні моменти часу. Метою даного дослідження є розробка та обґрунтування методологічних підходів до оцінки деформацій земної поверхні в зонах бойових дій з використанням даних супутникової інтерферометрії (InSAR), а також демонстрація її практичного застосування для моніторингу та аналізу наслідків військових дій

для земельних ресурсів. Досліджено негативні та руйнівні наслідки військових операцій для ґрунтової екосистеми. Порушення ґрунтового покриву земельних ділянок умовно поділяють на дві великі групи: первинні та вторинні. Зазначено, що основними типами деформації земельних ділянок у зонах бойових дій є кратерування та вибухові деформації, механічні зсуви, просідання поверхні. Розглянуто інтерферометрію як радіолокаційну технологію із синтезованою апертурою (InSAR), яка використовує пари або більше зображень високої роздільної здатності радіолокаційної технології із синтезованою апертурою (SAR) для створення високоякісних карт рельєфу місцевості за допомогою методів фазової інтерферометрії. Визначено методологічні аспекти оцінки деформації земельних ділянок у зонах бойових дій за допомогою супутникової інтерферометрії. Застосування InSAR вимагає адаптації стандартних методологій та врахування специфічних факторів. Комплексний методологічний підхід оцінки деформацій земної поверхні в зонах бойових дій передбачає етапи та аспекти, які формують методологію обробки та інтерпретацію даних інтерферометричної радіолокації із синтезованою апертурою (InSAR). Він включає в себе чотири етапи: збір та попередня підготовка InSAR-даних; формування інтерферограм; інтерпретація та валідація результатів; аналіз обмежень та рекомендації. Особливу увагу приділено прикладним рішенням з використання супутникової інтерферометрії під час оцінки деформацій земельних ділянок у зонах бойових дій. Супутникова інтерферометрія забезпечує об'єктивну, регулярну та безпечну оцінку стану земної поверхні у зонах бойових дій, шляхом використання фазових зрушень в радіосигналах супутника для визначення зсувів з точністю до міліметрів.

Ключові слова: супутникова інтерферометрія, InSAR, деформації земної поверхні, зони бойових дій, моніторинг, дистанційне зондування, оцінка пошкоджень.

Вступ. Збройні конфлікти та бойові дії спричиняють масштабні руйнування інфраструктури, зміни ландшафту та викликають значні деформації земної поверхні. Деформації є наслідком вибухів, зміщення ґрунтів, утворення вирв, руйнування будівель та гідротехнічних споруд, а також довгострокових ефектів, пов'язаних зі зміною гідрологічного режиму чи тектонічної активності, індукованої військовими діями. У зв'язку з цим постає необхідність у високоточному, систематичному та масштабному моніторингу змін земної поверхні в зонах бойових дій. Традиційні методи моніторингу, такі як наземні геодезичні вимірювання, часто є неможливими або небезпечними у їхньому здійсненні. Ефективним інструментом для цього стає супутникова інтерферометрія (Synthetic Aperture Radar (SAR)).

Супутникова радарна інтерферометрія (Interferometric Synthetic Aperture Radar – InSAR) – це технологія дистанційного зондування Землі, що дозволяє вимірювати дуже малі зміни відстані від супутника до земної поверхні з високою точністю (міліметри-сантиметри) на великих територіях [1-3]. Ця технологія базується на аналізі фазових різниць між двома або більше радарними зображеннями, отриманими з однієї або подібних орбіт у різні моменти часу [2]. Існують різні методи InSAR, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Основою є диференціальна InSAR (DInSAR), яка дозволяє виявити зміни рельєфу та деформації шляхом усунення топографічної складової з інтерферограми [3;4]. Цей метод успішно застосовується для моніторингу територій підземних сховищ газу [3] та зон гірничих виробок [5].

Значний прогрес у моніторингу деформацій досягнуто завдяки багаточасовій радарній інтерферометрії (MT-InSAR), що включає такі підходи, як Persistent Scatterer Interferometry (PSI) та Small Baseline Subset (SBAS) [6;7]. Ці методи дозволяють аналізувати велику кількість SAR-зображень, отриманих протягом тривалого періоду, для виявлення та кількісної оцінки повільних, але постійних деформацій. Вони ефективно долають проблеми тимчасової та просторової декореляції, що є важливим для зон зі складною динамікою. Застосування MT-InSAR знайшло своє відображення у дослідженнях зміщення земної поверхні для території урановидобування в Україні [8]. Українські науковці активно розвивають та адаптують InSAR технології для практичного використання. Так, К. Бурак та інші [1] у дослідженні геодезичного моніторингу деформацій методом радарної інтерферометрії, підкреслили його переваги як оперативність, невисока вартість та мінімальні затрати

часу, швидкий збір картографічної інформації. Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні, зокрема, на території Закарпаття, успішно здійснюється за даними радарної інтерферометрії [2], що свідчить про практичну реалізацію теоретичних розробок. Крім того, дослідження охоплюють моніторинг стану берегової зони території України [9], що демонструє широкий спектр застосування дистанційних методів. Важливим аспектом є також комп'ютерне моделювання у супутниковій геодезії та автоматизація вимірювань, яка значно підвищує ефективність аналізу даних InSAR [10].

Незважаючи на значні досягнення, застосування InSAR у зонах бойових дій, ця технологія має свої особливості та виклики. Пошкодження інфраструктури, руйнування будівель, зміна ландшафту внаслідок вибухів та інтенсивних бойових дій можуть впливати на когерентність SAR-сигналів, ускладнюючи отримання якісних інтерферограм. Однак, саме в таких умовах, де традиційні методи моніторингу є небезпечними або неможливими, дистанційні підходи набувають особливого значення. Моніторинг вертикальних зміщень техногенно навантажених територій методами супутникової інтерферометрії [11] може бути адаптований до умов зон бойових дій, де техногенне навантаження є екстремальним.

Метою даного дослідження є розробка та обґрунтування методологічних підходів до оцінки деформацій земної поверхні в зонах бойових дій з використанням даних супутникової інтерферометрії (InSAR), а також демонстрація її практичного застосування для моніторингу та аналізу наслідків військових дій для земельних ресурсів. Досягнення поставленої мети передбачає виконання наступних завдань: проаналізувати вплив бойових дій на стан земельних ділянок; оцінити потенціал супутникової інтерферометрії (InSAR); розробити методологію обробки та інтерпретації InSAR-даних; розглянути прикладні рішення та можливість їхнього застосування під час військових подій; визначити практичну цінність та перспективи подальших досліджень у цій галузі.

Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів. Одним з найбільш негативних та руйнівних наслідків військових операцій є порушення ґрунтової екосистеми. Порушення ґрантового покриву земельних ділянок умовно поділяють на дві великі групи: первинні – прямі механічні деформації, теплове забруднення та засмічення поверхні; вторинні – наслідки відсутності повоєнного відновлення, такі як підтоплення, засолення, ерозія, пірогенна деградація та дегуміфікація. Вплив військових дій на ґрунтовий покрив проявляється у механічних, фізичних та хімічних змінах (табл. 1) [12]. До механічних впливів відносяться ущільнення з пошкодженням гумусового шару, небезпечні геоморфологічні процеси (зсуви, осідання), бомбтурбація (утворення кратерів, котлованів, воронок), втрата фізико-хімічних властивостей ґрунту. Фізичний вплив проявляється через вібрацію ґрунтових мас, локальне підвищення температури тощо, а до хімічного – утворення локальних воєнно-техногенних геохімічних аномалій з різним спектром вибухових та інших токсичних речовин.

Зазначимо, що основними типами деформації земельних ділянок у зонах бойових дій – кратерування та вибухові деформації, механічні зсуви, просідання поверхні. Такі пошкодження земної поверхні можуть мати локальний (до 10–50 м²) або регіональний (до десятків км²) характер. Часова динаміка є важливим елементом оцінки деформаційних процесів і включає як миттєві деформації (вибухи), так і довготривалі процеси (зміни внаслідок зсувів чи руйнувань гідроспород). Регулярний моніторинг деформацій вимагає спостереження за змінами земної поверхні на певній ділянці протягом певного періоду часу. Спостереження можуть проводитися наземно або космічно. Крім того, ці методи спостереження можуть відрізнятися як для ділянок суші, так і для морських районів. Важливо пам'ятати, що не існує єдиного методу, який би дозволив повне розуміння просідання або підняття, проте поєднання двох або більше методів може дати набагато чіткіше уявлення. До космічних (супутникових) методів моніторингу можна віднести Глобальну систему позиціонування (GPS) та інтерферометрію з радіолокаційною технологією із синтезованою апертурою (InSAR).

На сьогодні GPS-технології забезпечують високу точність геодезичних робіт. Вони стали незамінним інструментом у вивченні руху тектонічних плит, деформацій, спричинених землетрусами, просідання ґрунту, стійкості шахт, дамб та мостів у вимірюванні точних змін положення. Інформацію про місцезнаходження з GPS можна отримати трьома способами: у режимі точного позиціонування, в режимі навігації та в кінематичному режимі. Маючи різний рівень точності, кожен з них підходить для

різних застосувань. Режим точного позиціонування є єдиним, який може забезпечити необхідну точність для безпосереднього вимірювання та моніторингу просідання на рівні 1-10 міліметрів (мм). Відповідно основними сильними сторонами GPS є виявлення рухів у міліметровому масштабі, а до недоліків можна віднести – забезпечення низької щільності точок вимірювання, дороге встановлення та експлуатація безперервної мережі GPS-станцій, надає інформацію лише в окремих місцях, а саме головне потребує значної кількості польових робіт та людських ресурсів, що не припустимо під час бойових дій [13].

Інтерферометрія з радіолокаційною технологією із синтезованою апертурою (InSAR) – це метод, який використовує пари або більше зображень високої роздільної здатності радіолокаційної технології із синтезованою апертурою (SAR) для створення високоякісних карт рельєфу місцевості за допомогою методів фазової інтерферометрії. SAR – це космічна (супутникова) радіолокаційна система високої роздільної здатності, а інтерферометрія – це термін, що використовується для пояснення накладання хвиль з метою виявлення відмінностей під час повторних зборів даних [14]. Це сучасний та недорогий інструмент для дистанційного вимірювання деформації ґрунту. Інструмент використовується для складання характеристики ділянок щодо просідання або підняття ґрунту, які постраждали як від природної, так і від людської діяльності (видобуток нафти або газу, гірничодобувні роботи та видобуток води). Останнім часом використовується під час бойових дій. Супутники спостереження Землі (EOS), на яких розташовані датчики SAR, обертаються навколо Землі на висотах 500-800 км. Ці датчики SAR здатні регулярно (кожні 5-30 днів) знімати великі площі та працювати вдень або вночі за будь-яких погодних умов [15]. Для створення зображення SAR з рухомої антени передаються послідовні імпульси радіохвиль на землю, а відбите відлуння кожного імпульсу приймається та записується між подіями передачі. SAR працює в різних діапазонах електромагнітного спектру залежно від частоти роботи. Найчастіше використовуються діапазони X (8-12 ГГц, довжина хвилі~3 см), C-діапазон (5-6 ГГц, довжина хвилі~6 см) та L-діапазон (1-2 ГГц, довжина хвилі~24 см) [7]. Точні вимірювання деформації ґрунту в міліметровому масштабі проводять протягом різного періоду часу (від днів до років), використовуючи різницю у фазі відбитих радіолокаційних сигналів від двох різних супутників, які проходять над тим самим місцем на поверхні Землі (Рис. 1).

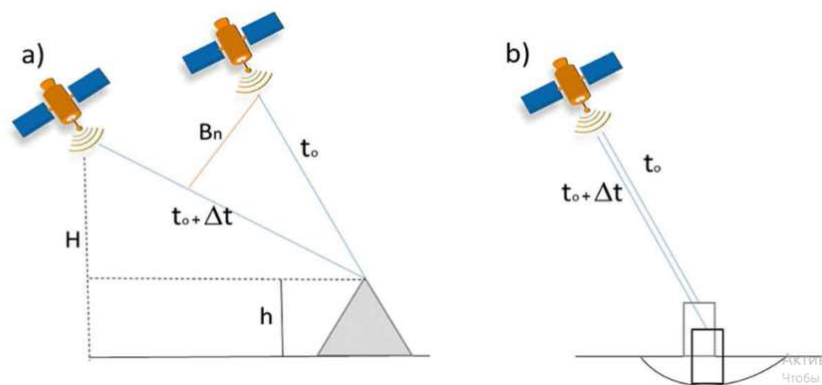


Рисунок 1 – Багатопрхідний SAR-аналіз (t_0 стосується часу першого аналізу, а $t_0 + \Delta t$ – часу другого аналізу). Геометрична конфігурація аналізу: а) для топографічного виявлення; H – висота орбіти, h – підвищення поверхні; б) для деформації поверхні

Figure 1 – Multi-pass SAR Analysis (t_0 refers to the time of the first analysis, and $t_0 + \Delta t$ – to the time of the second analysis). Geometric configuration of the analysis: a) for topographic detection; H – orbit height, h – surface elevation; b) for surface deformation

Якщо повторні спостереження за допомогою супутника SAR певної точки на землі дають однакові відстані, то очікується, що фаза відбитого сигналу буде однаковою. Якщо відстань між

повторними спостереженнями змінюється внаслідок рухів супутника або деформації поверхні Землі, то фаза відбитого сигналу також зміниться на величину, що дорівнює зміні довжини хвилі мікрохвильового сигналу, що використовується для вимірювань. Якщо положення супутника на його орбіті відоме точно, то, вимірявши зсув фази мікрохвильового сигналу, відбитого від області на поверхні Землі, можна розрахувати величину просідання або підняття цієї області за заданий період часу. Таким чином, зображення InSAR може бути отримане шляхом вимірювань зміни фази в тисячах пікселів на області на поверхні Землі [7].

На сьогодні найбільше використовують три типи InSAR-аналізу. Перший – Differential InSAR (D-InSAR), який використовується для фіксації змін між двома точками у часі. Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR) – другий тип, що забезпечує довготерміновий аналіз сталих точок на поверхні. Третій тип аналіз дозволяє виявляти поступові деформації при наявності серії супутникових знімків і називається SBAS (Small Baseline Subset).

Застосування InSAR для оцінки деформацій у зонах бойових дій вимагає адаптації стандартних методологій та врахування специфічних факторів, таких як:

- динамічний характер змін ландшафту, що може призводити до некогерентності радарного сигналу, адже руйнування будівель, переміщення техніки та пожежі значно ускладнюють формування стабільних когерентних точок;
- значні деформації спричиняють масштабні, різкі деформації, які перевищують межі чутливості стандартних InSAR методів (наприклад, перевищення 2 π фазового циклу);
- відсутність стабільних референсних точок для прив'язки;
- атмосферні явища (вологість, температура та тиск) можуть впливати на затримку радарного сигналу і часто спостерігаються над великими територіями, охопленими військовими діями;
- затінення та спотворення через рельєф території та частково зруйнованої міської забудови, що ускладнює точну інтерферометричну обробку;
- погана відбивна здатність рослинності через рух та коливання листя, гілок та стебл, які змінюють шлях поширення радіолокаційного сигналу, що призводить до втрати фазової інформації між послідовними знімками та зменшує інтенсивність сигналу, повертаючись до супутника, ускладнюючи точне визначення фази.

Для подолання вищезгаданих викликів необхідно застосовувати спеціалізовані InSAR методи та техніки [6;7]:

- багатотимчасовий InSAR (MT-InSAR), який включає методи аналізу – PS-InSAR (Persistent Scatterer Interferometry) та SBAS (Small Baseline Subset), що дозволяють виявляти та моніторити деформації на основі аналізу великої кількості інтерферограм. Це підвищує надійність вимірювань за рахунок усереднення атмосферних ефектів та ідентифікації стабільних (постійних) розсіювачів (Persistent Scatterers – PS) або когерентних пікселів, які зберігають когерентність протягом тривалого часу. У зонах бойових дій пошук таких PS може відбуватись на менш пошкоджених ділянках або на об'єктах, що мають високу відбивну здатність (металеві конструкції);
- швидкий InSAR моніторинг є ефективним для виявлення раптових і значних деформацій (наприклад, після вибухів) і передбачає використання короткої часової бази та аналіз послідовності знімків SAR високої частоти збору даних супутників Sentinel-1, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed;
- комбінування InSAR даних або інтеграція з іншими оптичними зображеннями високої роздільної здатності, як LiDAR, що покращить інтерпретацію отриманих деформаційних полів та розрізнить типи деформацій (наприклад, просідання, зсуви, утворення вирв);
- застосування сучасних алгоритмів (машинного навчання та алгоритмів глибокого навчання) передбачає автоматизацію ідентифікації областей деформацій, їхню класифікацію за типом та фільтрацію шуму, спричиненого бойовими діями;
- моделювання деформацій або розробка геомеханічних моделей сприяє кращому розумінню причин деформацій та прогнозуванню їх подальшого розвитку, враховуючи властивості ґрунтів, підстилаючих порід, а також характер військового впливу.

Таблиця 1 – Алгоритм супутникових радарних даних для виявлення та картографування деформацій у зонах бойових дій

Table 1 – Algorithm of Satellite radar data for detection and mapping of deformations in combat zones

Етап	Кроки	Характеристика
Збір та попередня підготовка InSAR-даних	Вибір території	Ідентифікація конкретних зон бойових дій, де передбачаються значні деформації земної поверхні (лінії зіткнення, райони інтенсивних обстрілів, місця розташування військових об'єктів).
	Часовий інтервал	Визначення періоду для аналізу, що охоплює до, під час та після активних бойових дій, для порівняльної оцінки змін.
	Вибір супутникових даних	Вибір типу супутникових даних (Sentinel-1, ALOS-2 PALSAR-2, TerraSAR-X) залежно від довжини хвилі (С-діапазон, L-діапазон, X-діапазон), просторової роздільної здатності та доступності для досліджуваної області. Враховується часова роздільна здатність (період повторного прольоту супутника) для забезпечення достатньої кількості знімків для часових рядів.
	Завантаження та організація даних	Отримання необроблених даних (Single Look Complex, SLC) з відповідних архівів (наприклад, Copernicus Open Access Hub для Sentinel-1). Створення структурованої системи зберігання даних для ефективного управління великими обсягами інформації.
	Вибір майстер-знімка	Визначення одного знімка як «майстер-знімка» (master image), до якого будуть прив'язані всі інші «слід-знімки» (slave images). Вибір майстер-знімка зазвичай базується на його високій якості, мінімальному атмосферному шумі та центральному положенні в часовому ряду.
Формування інтерферограм	Коресстрація знімків	Точне геометричне вирівнювання всіх слід-знімків до майстер-знімка. Виконується кореляція амплітуд знімків і коресстрація за порогом когерентності
	Генерація інтерферограм	Обчислення фазової різниці між коресстрованими майстер- та слід-знімками. Ця фазова різниця містить інформацію про рельєф місцевості та деформації. Комбінація інтерференційних ліній являє собою повний цикл 2л. На інтерферограмі деформації відображаються у вигляді кольорових смуг (циклів), де кожен повний цикл відповідає зміщенню поверхні на половину довжини хвилі радіолокаційного сигналу супутника. Густина цих смуг вказує на інтенсивність деформації: чим ближче розташовані кольорові лінії, тим більше було зміщення в цій ділянці. Для коректного створення інтерферограми та виділення деформацій з неї, обов'язковим є використання цифрових моделей рельєфу (ЦМР), таких як SRTM або DEM.
	Видалення топографічної фази	Використання цифрової моделі рельєфу (ЦМР, наприклад, SRTM, ASTER GDEM) для видалення топографічної складової з інтерферограми. Це дозволяє виділити фазу, пов'язану виключно з деформаціями.
	Оцінка та фільтрація когерентності	Розрахунок коефіцієнта когерентності для кожної інтерферограми, що вказує на якість інтерферометричного сигналу. Ефективне розгортання фази в InSAR вимагає попередньої фільтрації інтерферограми від шумів та визначення області обробки. Модуль розгортання усуває фазові розриви, що перевищують 2л, забезпечуючи безперервний вимір деформацій.
Інтерпретація та валідація результатів	Картографування деформацій	Створення карт деформацій, що відображають просторовий розподіл та величину вертикальних та/або горизонтальних зміщень.
	Часові ряди деформацій	Побудова графіків часових рядів деформацій для конкретних точок або регіонів, що дозволяє відстежувати динаміку змін
	Кореляція з подіями бойових дій	Аналіз отриманих деформацій у контексті відомих військових подій (обстріли, вибухи, фортифікаційні роботи, рух важкої техніки), що дозволяє ідентифікувати причини деформацій.
Аналіз обмежень та рекомендації	Вплив рослинності та руйнувань	Оцінка ступеня деградації когерентності через зміни рослинного покриву або масштабні руйнування інфраструктури. Для подолання цього обмеження – використання супутників з довгими хвилями (L-діапазон)
	Складність розділення джерел деформацій	Розрізнення деформацій, спричинених бойовими діями, від природних процесів (зсуви, осідання, тектонічні рухи).
	Доступність ЦМР	Необхідність використання точної ЦМР, що може бути проблемою в регіонах з частими змінами рельєфу через військові дії.
	Атмосферні ефекти	Попри корекцію, залишкові атмосферні артефакти можуть впливати на точність
	Пост-конфліктний моніторинг	Застосування InSAR для моніторингу відновлювальних процесів, виявлення нових деформацій, пов'язаних з розмінуванням, будівництвом або осіданням ґрунту після руйнувань.

Відповідно, оцінка деформацій земної поверхні в зонах бойових дій за допомогою InSAR вимагає специфічного методологічного підходу, що враховує специфічні умови та особливості таких територій. Комплексний методологічний підхід передбачає етапи та аспекти, які формують методологію обробки

та інтерпретацію даних інтерферометричної радіолокації із синтезованою апертурою (InSAR). Методологія описує послідовність кроків (етапів), необхідних для перетворення необроблених супутникових даних у карти деформацій, а також підходи до їхнього подальшого аналізу та інтерпретації. Вона включає в себе чотири етапи – від попередньої підготовки даних до генерації карт деформацій та їх валідації (табл. 1).

Супутникова інтерферометрія з синтезованою апертурою (InSAR) є сучасним дистанційним методом моніторингу деформацій земної поверхні. У контексті зон бойових дій, де традиційні наземні методи є небезпечними або неможливими, InSAR може вирішити ряд прикладних завдань.

На сьогодні розроблено ефективні підходи моніторингу осідань та підняття ґрунту, які виникають після вибухів, руйнувань будівель, пошкодження інженерних комунікацій (водопроводів, каналізації), зміни рівня ґрунтових вод та інших наслідків бойових дій. Ці негативні процеси створюють ризик для існуючих та майбутніх споруд, доріг, а також можуть впливати на дренажні системи. Завдяки InSAR створюють карти вертикальних деформацій з точністю до міліметрів або сантиметрів та виявляють ділянки, де відбувається осідання або підняття. Порівнюючи інтерферограми, отримані до та після подій, можна кількісно оцінити амплітуду та швидкість цих рухів. Технології такі як PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR) або SBAS-InSAR (Small Baseline Subset InSAR) використовуються для аналізу довгострокових деформацій та виявлення окремих стабільних точок (рис. 2).

Загальна карта деформацій земної поверхні території (рис. 2) розділяє об'єкт дослідження на зони. Зона 1 характеризується максимальними підняттями – 3–4 см за 2 роки. Ця зона розташована на півночі досліджуваної території в межах Свалявського району. Вона займає близько 10 % регіону. Зона 2 характеризується значеннями вертикальних зміщень 1–2 см за 2 роки. Вона займає близько 70 % території, включаючи в себе міста Мукачеве, Іршава, Межигір'я, Поляна і Голятин. Зона 3 займає 20 % досліджуваної території та включає в себе ділянки з опусканням території до 0,3–5,5 см за 2 роки [2].

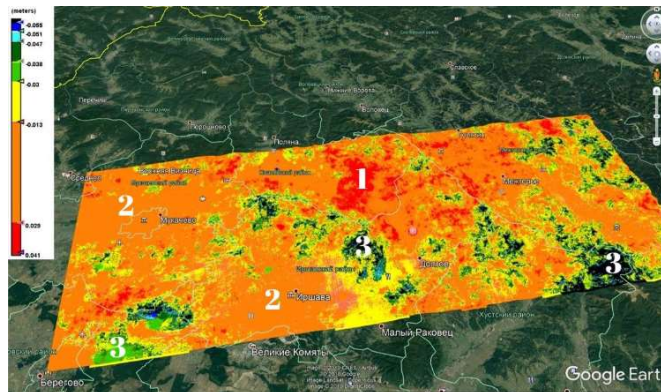


Рисунок 2 – Загальна карта деформацій земної поверхні території Закарпаття
Figure 2 – General Map of Surface Deformations in the Territory of Zakarpattia Джерело: [2]

InSAR є ефективним інструментом для моніторингу горизонтальних зміщень ґрунту, що є характерним для зсувів. Адже інтенсивні бойові дії, вибухи та порушення ландшафту (будівництво окопів, вирви, воронки від вибухів снарядів) дестабілізують схили, активізуючи існуючі зсувні процеси. Шляхом аналізу фазових відмінностей між радарними знімками, можна виявити навіть повільні рухи схилів, які невидимі неозброєним оком. Створення часових рядів деформацій дозволяє відстежувати динаміку зсувних процесів. Згідно досліджень [1] були розроблені карти геодинамічних процесів за допомогою супутникової інтерферометрії рудника «Хотінь» Калуш-Голинського родовища. На досліджуваній території зафіксовано три зони: стабільна зона, активна зона осідань зі швидкістю від -6 мм до -20 мм, границі якої чітко співпадають з мульдою зсуву, зумовленою підземними виробітками, та окремі пункти, з осіданнями до 40 мм (рис. 3).

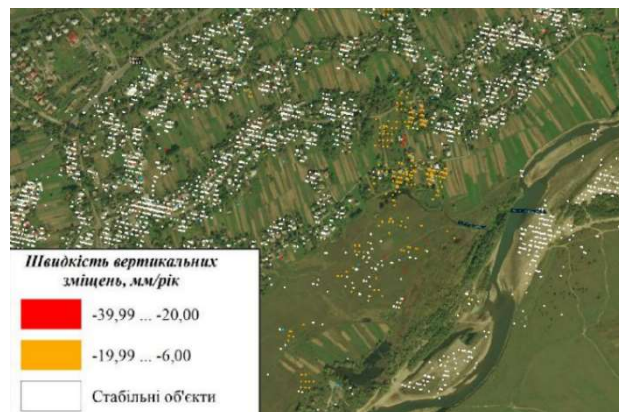


Рисунок 3 – Місця виявлення геодинамічних процесів за допомогою супутникової інтерферометрії

Figure 3 – Locations of geodynamic process detection using satellite interferometry, Джерело:[1]

Зазначимо, що воронки від вибухів (кратери) не тільки змінюють топографію, але й суттєво порушують структуру ґрунту навколо себе, створюючи зони декомпресії та дестабілізації. Це може призвести до подальших осідань, утворення провалів або негативного впливу на прилеглі споруди. Відповідно проведення оцінки впливу вибухів та кратерів на стійкість території вирішується завдяки InSAR. Безпосередньо виміряти глибину кратера за допомогою InSAR не можна, але можна виявити та кількісно оцінити деформації ґрунту в навколишній зоні впливу вибуху. Аналіз інтерферограм, отриманих безпосередньо до і після вибуху, може показати зону порушення цілісності ґрунту, що виходить за межі видимого кратера. Так, наприклад дані Sentinel-1 підтверджують деформацію прифронтових ділянок сільськогосподарського призначення Ізюмського району Харківської області після артилерійських обстрілів (рис. 4).

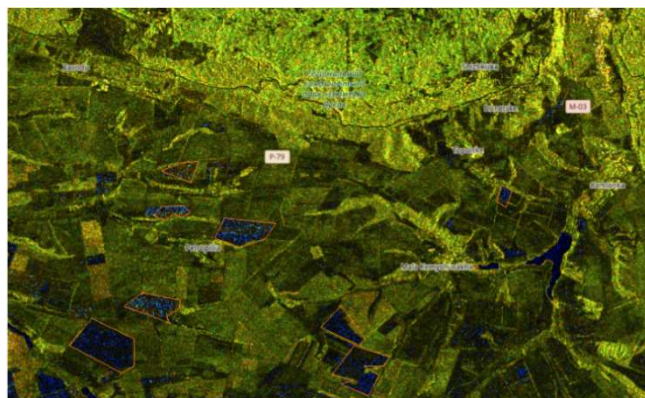


Рисунок 4 – Карта деформації прифронтових ділянок сільськогосподарського призначення Ізюмського району Харківської області

Figure 4 – Deformation map of frontline agricultural areas in the izium district of kharkiv region

На рисунку 4 представлено деформації прифронтових ділянок сільськогосподарського призначення Ізюмського району Харківської області на основі супутникового знімання Sentinel-1 IW VV+VH «Покращена візуалізація». Цей скрипт поєднує гамма0 поляризацій VV та VH у візуалізацію зі штучними кольорами. Він відображає акваторії синім (частково чорним) кольором, а сушу - різними відтінками жовтого/зеленого. Міські райони відображаються у світло-зелено-жовтому кольорі (у

напрямку до білого), ділянки з рослинністю - у гірчично-зеленому, а гола земля - у темно-зеленому. Ділянки темно фіолетового кольору не належать до ознак природних явищ снігу або води. Їхня структура порушена вирвами, траншеями, що змінило радарне зображення.

Крім того, за допомогою даних SAR можна оцінити пошкодження будівель [16]. Дослідження показали, що більшість пошкоджених будівель, виявлених за допомогою аналізу інтенсивності SAR, є середніми та великими будівлями (наприклад, багатопверхові житлові будинки, громадські установи, комерційні будівлі, склади та виробничі споруди). Прикладом є проведена оцінка пошкоджень будівель, пов'язаних з війною, у Києві з використанням радара Sentinel-1 та оптичних зображень Sentinel-2. [17]. Для оцінки пошкоджень було використано простий та надійний логарифмічний коефіцієнт інтенсивності SAR для Sentinel-1 та текстурний аналіз для Sentinel-2. Щоб приховати зміни від інших особливостей та типів ландшафтного покриву, не пов'язаних з міськими районами, побудовано маску забудованої території з використанням контурів будівель та світового сліду поселень (WSF) Open Street Map. Точність робіт встановлена за допомогою оптичних зображень дуже високої роздільної здатності та кількісної оцінки за допомогою карти оцінки пошкоджень Центру супутникового зв'язку Організації Об'єднаних Націй (UNOSAT). Результати наукової розвідки показали, що пошкоджені будівлі зосереджені переважно в північно-західній частині досліджуваної території, де розташовані Ірпінь і сусідні міста Буча та Гостомель. Виявлені пошкодження будівель добре відповідають еталонним зображенням WorldView.

Під час війни актуальним є моніторинг стабільності критичної інфраструктури як мости, дороги, залізничні колії, дамби, газопроводи та інше. Ці об'єкти схильні до деформацій внаслідок вибухів, зміщення ґрунтів або пошкоджень від важкої техніки. Руйнування або їхнє пошкодження має катастрофічні наслідки. Саме методика використання даних InSAR дозволяє здійснювати безперервний дистанційний моніторинг стабільності таких об'єктів. Вона може виявляти мінімальні деформації, які свідчать про структурні пошкодження або зміщення фундаменту. Успішним прикладом є застосування методу диференціальної інтерферометрії для території Богородчанського підземного сховища газу. Завдяки застосованому методу, зафіксовано вертикальні рухи (осідання/підняття) гирл експлуатаційних свердловин спричинені циклічними змінам тиску в процесі технічної експлуатації газосховища. Середня величина осідання свердловин в результаті відкачування газу становила 15-19 мм; максимальна величина осідання досягла -26 мм. В період закачування газу до сховища зафіксовано підняття свердловин в середньому на 10-15 мм; максимальна величина підйому досягала +30 мм. Для покращення співвідношення сигнал-шум на радіолокаційних знімках для територій підземного сховища газу рекомендується встановлювати наземні кутові відбивачі різних конструкцій. Це особливо важливо в місцях розташування гирл свердловин та вздовж основних ліній геометричного нівелювання [3]. Підтвердженням дієвості методу в умовах війни дозволить вжити заходів для ремонту та запобігання аварійних ситуацій.

Використання методу радіолокаційної інтерферометрії забезпечує визначення зміщення земної поверхні з високою точністю. Метод забезпечує моніторинг довгострокових змін земної поверхні, спричинених військовими конфліктами, адже зміни русел річок, деградація ґрунтів, вплив на рослинність, може бути невидима на короткострокових знімках. Відзначимо, що земна поверхня вважається нестабільною, якщо ґрунт просідає більше ніж 35 мм та має швидкість осадонакопичення більше ніж 1 мм/місяць. Використання цього методу обґрунтовується тим, що дані отримуються та обробляються дистанційно та, як правило, не потребують присутності на об'єкті. Метод радіолокаційної інтерферометрії успішно застосовується в зарубіжних країнах на гірничодобувних та нафтовидобувних об'єктах [6;7;15].

Відновлення звільнених територій пов'язане з розмінуванням земельних ділянок. Безпечно проведення операцій з розмінування потребує інформації про стабільність ґрунту, з уникнення додаткових ризиків для саперів. За допомогою InSAR виявляють ділянки зі значними деформаціями ґрунту, що спричинені прихованими вибухами, мінуванням або нестабільністю, пов'язаною з порушеннями ландшафту. Ця інформація допомагає уникнути ділянок, які можуть несподівано

зрушити або обвалитися під час робіт з розмінування, оптимізувати маршрути розмінування, визначити безпечні проходи та робочі зони для персоналу і техніки.

Висновки. Супутникова інтерферометрія є важливим інструментом для оцінки деформацій земельних ділянок у зонах бойових дій. Супутники InSAR безпосередньо не вимірюють висоту чи рух землі, вони передають отримані радіолокаційні сигнали, які потім обробляються в інтерпретації зміщення (процес розгортання). Рух землі, отриманий за допомогою цього методу, є «оцінкою», а не пряме «вимірювання».

Адаптовані методи обробки InSAR даних дозволяють отримувати відомості про зміни земної поверхні. Методологічний підхід для оцінки деформацій у зонах бойових дій за допомогою InSAR є багатоступінним та передбачає принципи супутникової інтерферометрії, так і специфіку наслідків військових дій. Він включає наступні етапи: визначення та обґрунтування району дослідження; збір та попередній відбір супутникових InSAR-даних; формування інтерферограм; інтерпретація та валідація результатів аналіз обмежень та рекомендації.

Однією з ключових переваг такої технології є можливість створення карт деформації земної поверхні, цифрових моделей рельєфу (DEM), детальних цифрових моделей стабільності територій, шляхом використання фазових зрушень в радіосигналах супутника для визначення зсувів з точністю до міліметрів. Це сприяє глибшому розумінню геодинамічних процесів, моніторингу стабільності інфраструктури та ефективному плануванню відновлювальних робіт, особливо у важкодоступних або небезпечних зонах. Дає можливість не лише підвищити якість даних, але й зменшити обсяг польових робіт, що особливо важливо у зонах ведення бойових дій. Застосування цієї технології допоможе не лише оцінити масштаб руйнувань, але й мінімізувати ризики, підвищити ефективність відбудови та забезпечити безпеку людей.

Міжнародний та вітчизняний досвід демонструє ефективність впровадження методів обробки InSAR даних під час оцінки деформацій земельних ділянок. Наприклад, в Іраку ця технологія була використана для картографування пошкоджень міста Мосул, а в Україні – міст Ірпінь, Буча та Гостомель.

Попри очевидні переваги, використання супутникової інтерферометрії для оцінки деформацій земельних ділянок у зонах бойових дій супроводжується певними викликами, а саме: динамічний характер змін ландшафту, значні деформації (перевищення 2л фазового циклу), відсутність стабільних референсних точок, чутливість до погодних умов, затінення та спотворення через рельєф території та частково зруйнованої міської забудови, погана відбивна здатність рослинності.

Перспективами розвитку є використання даних із супутників нового покоління (ICEYE, Capella Space), що дозволяє вести цілодобовий, всепогодний моніторинг; інтеграція з дронами та наземними вимірюваннями; поєднання InSAR з ШІ/машинного навчання для автоматичного виявлення деформацій на великих масивах зображень (наприклад, виявлення змін, класифікація об'єктів). Це сприятиме вдосконаленню технологій отримання та обробки радіолокаційних даних і дозволить швидко визначити зони можливих деформацій земної поверхні на територіях проведення бойових дій.

Перелік посилань

1. Бурак К.О., Ковтун В.М., Дорош Л.І., Пакшин М.Ю., Ляска І. І. Геодезичний моніторинг деформацій методом радарної інтерферометрії. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings (27–28 april 2018, Brno). Brno, 2018. P. 176 -171.
2. Углицьких Є., Вижва С., Іванік О. Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні території Закарпаття за даними радарної інтерферометрії. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. Київ, 2020. № 4(91). С. 94-99.
3. Кухтар Д., Олесків Р. Метод диференціальної радарної інтерферометрії для моніторингу територій підземного сховища газу. Технічні науки та технології. Чернігів, 2023. № 3(33). С. 235-241.

4. Нестеренко С. Використання інтерферометричних методів визначення деформацій земної поверхні. Просторове планування для майбутнього України: збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції (25 – 26 травня 2023 р., м. Полтава). Полтава, 2023. С.145-148.
5. Кухтар Д. Аналіз деформацій земної поверхні у районі гірничих виробок рудника «Калуш» за даними радіолокаційного знімання 2018–2022 рр. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Львів, 2024. Вип. I (47). С. 110-117.
6. Matano F. Analysis and Classification of Natural and Human-Induced Ground Deformations at Regional Scale (Campania, Italy) Detected by Satellite Synthetic-Aperture Radar Interferometry Archive Datasets. *Remote Sens.* 2019. №11. P. 2822. <https://doi.org/10.3390/rs11232822>
7. Boni R., Pilla G., Meisina C. Methodology for Detection and Interpretation of Ground Motion Areas with the A-DInSAR Time Series Analysis. *Remote Sens.* 2016. № 8. P. 686. <https://doi.org/10.3390/rs8080686>
8. Станкевич С. А., Свіденюк М. О., Дудар Т. В. Застосування багаточасової радарної інтерферометрії для виявлення зміщення земної поверхні для території урановидобування в Україні. Екологічна безпека. Кременчук, 2019. № 2 (28). С. 18-23.
9. Антонюк О.С. Особливості дистанційного моніторингу стану берегової зони території України. Перспективні напрямки наукових досліджень : збірник тез XIV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (24 листопада 2017 р., м. Вінниця). Вінниця, 2017. С. 4-7.
10. Дьоміна Н. А., Морозов М. В. Комп'ютерне моделювання у супутниковій геодезії та автоматизація вимірювань. Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь, 2019. Вип. 12, том 1. С. 19-33
11. Петров С. Л. Моніторинг вертикальних зміщень техногеннонавантажених територій геодезичними методами : автореф. дис. ... канд. т. наук. Львів, 2018. 20 с.
12. Голубцов О., Сорокіна Л., Сплодитель А., Чумаченко С. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу. Київ, 2023. 32 с.
13. Третяк К., Брусак І. Сучасні деформації земної кори території заходу України за даними ГНСС мережі «GEOTERRACE». Геодинаміка. Львів, 2022 №1(32). С. 16-25
14. Dehghan-Soraki Y., Sharifikia M., Sahebi, M. R. A comprehensive interferometric process for monitoring land deformation using ASAR and PALSAR satellite interferometric data. *GIScience & Remote Sensing.* 2015. № 52(1). P. 58–77.
15. Mohammadimanesh F., Salehi B., Mahdianpari M., English J., Chamberland J., Alasset P. J. Monitoring surface changes in discontinuous permafrost terrain using small baseline SAR interferometry, object-based classification, and geological features: a case study from Mayo, Yukon Territory, Canada. *GIScience & Remote Sensing,* 2018. №56(4). P. 485–510. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1513444>
16. Bloorani AD., Darvishi M., Weng Q., Liu X. Post-War Urban Damage Mapping Using InSAR: The Case of Mosul City in Iraq. *ISPRS International Journal of Geo-Information.* 2021. №10(3):140. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030140>
17. Aimaiti Y., Sanon C., Koch M., Baise LG., Moaveni B. War Related Building Damage Assessment in Kyiv, Ukraine, Using Sentinel-1 Radar and Sentinel-2 Optical Images. *Remote Sensing.* 2022; № 14(24):6239. <https://doi.org/10.3390/rs14246239>.

APPLICATION OF REMOTE SENSING INTERFEROMETRY TO MONITOR LAND DEFORMATIONS IN COMBAT ZONES: METHODOLOGICAL PRINCIPLES AND APPLIED ASPECTS

Serbov Mykola G., Doctor of Economic Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Hydrometeorology and Ecology, Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine, e-mail: serbovng@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0220-6745>

Nataliia Danilova V., Candidate of Geographical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Agrometeorology and Agroecology, Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine, e-mail: nataliadanilova0212@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2334-6058>

Pylypiuk Viktor V., Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Land Hydrology, Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine, e-mail: pilipukvv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0365-4275>

Summary. This article is dedicated to exploring the potential of satellite interferometry (InSAR) for assessing surface deformations in combat zones. Armed conflicts and military operations cause landscape alterations and significant ground surface deformations. In situations where traditional monitoring methods are dangerous or impossible, remote sensing approaches gain particular importance. An effective tool for detecting surface deformation is satellite interferometry, which is based on analyzing phase differences between two or more radar images acquired from the same or similar orbits at different times. The aim of this study is to develop and justify methodological approaches for assessing surface deformations in combat zones using satellite interferometry (InSAR) data, as well as to demonstrate its practical application for monitoring and analyzing the impact of military operations on land resources. The study investigates the negative and destructive consequences of military activities on the soil ecosystem. Disturbances to the soil cover of land plots are conventionally divided into two major groups: primary and secondary. It is noted that the main types of land deformation in combat zones include cratering and explosive deformations, mechanical displacements, and surface subsidence. Interferometry is considered as a synthetic aperture radar (SAR) technology that utilizes pairs or more high-resolution SAR images to generate high-quality terrain maps through phase interferometry methods. The methodological aspects of land deformation assessment in combat zones using satellite interferometry are defined. The application of InSAR requires adapting standard methodologies and considering specific contextual factors. A comprehensive methodological approach for assessing surface deformations in combat zones includes stages and elements that form the methodology for processing and interpreting InSAR data. It consists of four stages: collection and preprocessing of InSAR data; generation of interferograms; interpretation and validation of results; analysis of limitations and recommendations. Special attention is given to applied solutions involving satellite interferometry for assessing land deformation in combat areas. Satellite interferometry provides objective, regular, and safe assessment of surface conditions in combat zones by using phase shifts in satellite radio signals to detect ground displacements with millimeter-level precision.

Keywords: satellite interferometry, InSAR, surface deformations, combat zones, monitoring, remote sensing, damage assessment.

References

1. Burak K.O., Kovtun V.M., Dorosh L.I., Pakshyn M.YU., Lyaska I. I. Heodezychnyy monitorynh deformatsiy metodom radarnoyi interferometriyi. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings (Geodetic monitoring of deformations by radar interferometry. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings). (27–28 april 2018, Brno). Brno, 2018. P. 176 -171 [in Ukrainian].
2. Uhlyts'kykh YE., Vyzhva S., Ivanik O. Monitorynh vertykal'nykh zmishchen' zemnoyi poverkhni terytoriyi Zakarpattya za danyamy radarnoyi interferometriyi (Monitoring of vertical displacements of the earth's surface in the territory of Transcarpathia using radar interferometry data). Visnyk Kyivskoho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiya. Kyiv, 2020. № 4(91). S. 94-99 [in Ukrainian].
3. Kukhtar D., Oles'kiv R. Metod dyferentsial'noyi radarnoyi interferometriyi dlya monitorynhu terytoriy pidzemnoho skhovyshcha hazu (Differential radar interferometry method for monitoring underground gas storage areas). Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi. Chernihiv, 2023. № 3(33). S. 235-241 [in Ukrainian].
4. Nesterenko S. Vykorystannya interferometrychnykh metodiv vyznachennya deformatsiy zemnoyi poverkhni. Prostorove planuvannya dlya maybutn'oho Ukrainy: zbirnyk tez Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (Using interferometric methods for determining deformations of the earth's surface.

Spatial planning for the future of Ukraine: collection of abstracts of the All-Ukrainian scientific and practical conference) (25 – 26 travnya 2023 r., m. Poltava). Poltava, 2023. S.145-148 [in Ukrainian].

5. Kukhtar D. Analiz deformatsiy zemnoyi poverkhni u rayoni hirnychkykh vyrobok rudnyka «Kalush» za danymy radiolokatsiynoho znimannya 2018–2022 rr. (Analysis of deformations of the earth's surface in the area of the Kalush mine workings according to radar survey data from 2018–2022) Suchasni dosyahnennya heodezychnoyi nauky ta vyrobnytstva. L'viv, 2024. Vyp. I (47). S. 110-111 [in Ukrainian].

6. Matano, F. (2019) Analysis and Classification of Natural and Human-Induced Ground Deformations at Regional Scale (Campania, Italy) Detected by Satellite Synthetic-Aperture Radar Interferometry Archive Datasets. *Remote Sens.* 11. 2822. [in English].

7. Boni, R., Pilla, G., Meisina, C. (2016) Methodology for Detection and Interpretation of Ground Motion Areas with the A-DInSAR Time Series Analysis. *Remote Sens.* 8. 686. <https://doi.org/10.3390/rs8080686> // [in English].

8. Stankevych S. A., Svidenyuk M. O., Dudar T. V. Zastosuvannya bahatochasovoyi radarnoyi interferometriyi dlya vyyavlennya zmishchennya zemnoyi poverkhni dlya terytoriyi uranovydobuvannya v Ukrayini (Application of multi-temporal radar interferometry to detect earth surface displacement for uranium mining areas in Ukraine). *Ekolohichna bezpeka*. Kremenchuk, 2019. № 2 (28). S. 18-23 [in Ukrainian].

9. Antonyuk O.S. Osoblyvosti dystantsiynoho monitorynhu stanu berehovoyi zony terytoriyi Ukrayiny. *Perspektyvni napryamky naukovykh doslidzhen' : zbirnyk tez KHIV Mizhnarodnoyi naukovo praktychna internet-konferentsiyi* (Features of remote monitoring of the coastal zone of Ukraine. Promising directions of scientific research: collection of abstracts of the XIV International Scientific and Practical Internet Conference) (24 lystopada 2017 r., m. Vinnytsya). Vinnytsya, 2017. S. 4-7 [in Ukrainian].

10. D'omina N. A., Morozov M. V. Komp'yuterne modelyuvannya u suputnykoviy heodeziyi ta avtomatyzatsiya vymiryuvan' (Computer modeling in satellite geodesy and automation of measurements). *Naukovyy visnyk TDATU. Melitopol'*, 2019. Vyp. 12, tom 1. S. 19-33 [in Ukrainian].

11. Petrov S. L. Monitorynh vertykal'nykh zmishchen' tekhnohennonavantazhenykh terytoriy heodezychnymy metodamy (Monitoring of vertical displacements of technogenically loaded territories by geodetic methods) : avtoref. dys. ... kand. t. nauk. L'viv, 2018. 20 s [in Ukrainian].

12. Holubtsov O., Sorokina L., Splodytel' A., Chumachenko S. Vplyv viyny rosiyi proty Ukrayiny na stan ukrayins'kykh gruntiv. Rezul'taty analizu (The impact of the Russian war against Ukraine on the state of Ukrainian soils.). Kyiv, 2023. 32 s [in Ukrainian].

13. Tretyak K., Brusak I. Suchasni deformatsiyi zemnoyi kory terytoriyi zakhodu Ukrayiny za danymy HNSS merezhi «GEOTERRACE» (odern deformations of the earth's crust in the territory of western Ukraine according to GNSS data of the "GEOTERRACE" network). *Heodynamika*. L'viv, 2022 №1(32). S. 16-2 [in Ukrainian].

14. Dehghan-Soraki, Y., Sharifikia, M., Sahebi, M. R. (2015) A comprehensive interferometric process for monitoring land deformation using ASAR and PALSAR satellite interferometric data. *GIScience & Remote Sensing.* 52(1). 58–77 [in English].

15. Mohammadimanesh, F., Salehi, B., Mahdianpari, M., English, J., Chamberland, J., Alasset, P. J. (2018) Monitoring surface changes in discontinuous permafrost terrain using small baseline SAR interferometry, object-based classification, and geological features: a case study from Mayo, Yukon Territory, Canada. *GIScience & Remote Sensing.* 56(4). 485–510 [in English].

16. Bolorani, AD., 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> // [in English].

17. Aimaiti Y., Sanon C., Koch M., Baise LG., 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> // [in English]