

Соціально-економічні та екологічні аспекти деформації споруд у зонах техногенного впливу: методи оцінки та мінімізації ризиків

<https://doi.org/10.17721/2786-4561.2026.7.1-7/14>

Юрченко М.А.

<https://orcid.org/0009-0008-5374-6953>

Київський національний університет імені Тараса
Шевченка, Київ, Україна,
kola.yurchenko.a@gmail.com

Надійшла до редакційної колегії 05.01.2026

Прийнята: 25.04.2026

Анотація. У статті досліджено прояви осідання територій і деформацій споруд у зонах техногенного навантаження, а також оцінено їх соціально-економічні та екологічні наслідки. Міжнародні наукові джерела свідчать, що антропогенні чинники є домінуючою причиною сучасних процесів осідання земної поверхні – їх частка становить 77% випадків у світі. Зони з високою ймовірністю осідання охоплюють близько 2,2 млн км² та загрожують приблизно 21% світового ВВП. Розглянуто прямі й опосередковані економічні збитки, зокрема витрати на ремонт інфраструктури, зниження вартості нерухомості та перебої у господарській діяльності. Виявлено, що екологічними наслідками осідання є порушення гідрологічного режиму, деградації ґрунтів, розширення зон підтоплення і хімічного забруднення довкілля. Проаналізовано практичне значення систем геодезичного та супутникового моніторингу як інструментів раннього виявлення деформацій та управління ризиками. На основі порівняльного аналізу міжнародного досвіду (Нідерланди, Німеччина, Швеція, Китай, США, Індія, Україна) визначено ключові стратегії мінімізації наслідків осідань і сформульовано рекомендації щодо вдосконалення підходів до управління техногенними деформаціями в Україні.

Ключові слова: осідання земної поверхні; деформації споруд; антропогенний вплив; геодезичний моніторинг; наслідки осідання; управління ризиками.

Economic and Environmental Aspects of Structural Deformation in Areas of Technogenic Impact: Methods for Risk Assessment and Mitigation

Yurchenko M.A.

<https://orcid.org/0009-0008-5374-6953>

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
kola.yurchenko.a@gmail.com

Abstract. The article examines manifestations of land subsidence and structural deformation in areas affected by anthropogenic pressure and evaluates their socio-economic and environmental consequences. International scientific studies indicate that anthropogenic factors are the dominant drivers of contemporary land subsidence processes, accounting for approximately 77% of recorded cases worldwide, with this share reaching 91% in Europe. Areas with a high probability of subsidence cover nearly 2.2 million km² and pose a potential threat to about 21% of global GDP, highlighting the large-scale economic risks associated with these processes. The study analyzes both direct and indirect economic losses caused by subsidence, including the costs of infrastructure repair and maintenance, depreciation of real estate value, disruption of urban services, and interruptions in economic activity. Particular attention is paid to environmental consequences, such as changes in the hydrological regime, soil degradation, expansion of flood-prone areas, and chemical contamination of natural ecosystems. The practical significance of geodetic and satellite monitoring systems is also examined as effective tools for the early detection of ground deformation and risk management. Modern monitoring technologies, including satellite interferometry and continuous geodetic observations, allow for the identification of deformation trends, enable timely engineering interventions, and support the development of preventive measures. Based on a comparative analysis of international experience (the Netherlands,

Germany, Sweden, China, the United States, India, and Ukraine), key strategies for minimizing the consequences of land subsidence are identified, and recommendations are proposed for improving approaches to managing technogenic deformation processes in Ukraine, particularly in the Kryvyi Rih mining basin.

Keywords: land subsidence; structural deformation; anthropogenic impact; geodetic monitoring; consequences of subsidence; risk management.

Вступ. У сучасних містах деформації споруд дедалі частіше пов'язані з техногенним перетворенням геологічного середовища. Інтенсивна забудова, підземне будівництво, зміни гідрогеологічних умов і гірничо-технічна діяльність формують складну систему впливів на основи будівель і спричиняють розвиток осідань земної поверхні. За результатами узагальнених досліджень близько 77% усіх зафіксованих випадків осідання у світі пов'язані з антропогенними чинниками. У більшості регіонів їх частка перевищує природні процеси, що підтверджується високими показниками в Європі (91%), Азії та Океанії (88%), Америці (70%) та Африці (64%). Отримані результати свідчать про домінуючу роль діяльності людини у формуванні сучасних процесів осідання земної поверхні (Huning et al., 2024). Поширення таких процесів супроводжується значними економічними та екологічними наслідками. Осідання земної поверхні та пов'язані з ними деформації споруд призводять до пошкодження будівель, транспортної та інженерної інфраструктури, порушення роботи комунальних мереж, а також змін у природному середовищі. У результаті зростають витрати на ремонт, реконструкцію та підтримання експлуатаційної придатності об'єктів і територій. Це зумовлює потребу у дослідженні наслідків таких процесів і пошуку ефективних підходів до їх моніторингу, оцінювання ризиків та управління ними. У зв'язку з цим метою дослідження є аналіз проявів осідання територій і, як наслідок, деформацій споруд у зонах техногенного навантаження, а також оцінка їх економічних та екологічних наслідків і ролі систем моніторингу у зниженні пов'язаних із ними ризиків. Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань: проаналізувати наукові публікації та описані у літературі випадки осідання територій і деформацій споруд; визначити основні економічні та екологічні наслідки цих процесів; дослідити практичне значення систем геодезичного та супутникового моніторингу у виявленні та контролі деформацій; узагальнити міжнародний досвід реагування на наслідки осідань і мінімізації пов'язаних ризиків; визначити можливі напрями вдосконалення підходів до управління деформаційними процесами в Україні.

Матеріали і методи дослідження. У роботі використано теоретичні та емпіричні методи дослідження. До теоретичних методів належать аналіз і узагальнення наукових публікацій та аналітичних звітів, що дозволило систематизувати сучасні уявлення про деформаційні процеси в умовах техногенного навантаження та їх наслідки. Також застосовано порівняльний аналіз для зіставлення підходів до оцінки та управління осіданням територій у різних країнах і умовах. Окрім цього, використано аналіз наукових публікацій для виявлення закономірностей розвитку деформаційних процесів і їх впливу на забудову, господарську діяльність і навколишнє середовище.

Емпірична складова дослідження представлена аналізом описаних у наукових джерелах випадків осідання територій і деформацій споруд, що дало змогу розглянути їх реальні прояви та наслідки. У межах дослідження також проаналізовано результати спостережень і моніторингу деформацій у зонах техногенного навантаження та їх вплив на функціонування територій і об'єктів інфраструктури.

Окрему увагу приділено системам моніторингу деформацій як інструменту раннього виявлення небезпечних процесів і зниження ризиків пошкодження інфраструктури. Також проаналізовано міжнародний та український досвід реагування на наслідки осідання територій і деформацій споруд.

Результати та їх обговорення. До економічних наслідків осідання територій і деформації споруд відноситься, в першу чергу, пошкодження будівель і споруд, що зумовлює потребу у їх ремонті, підсиленні або реконструкції. Суттєвим наслідком є порушення роботи інженерної

інфраструктури, зокрема мереж водопостачання, водовідведення, газопостачання та дренажних систем, що призводить до зниження їх надійності, втрат ресурсів і необхідності аварійних відновлювальних робіт. Осідання також спричиняє деформації транспортної інфраструктури -автомобільних доріг, мостів, залізничних колій, що обмежує пропускну здатність, ускладнює експлуатацію та потребує додаткових інженерних заходів. Важливим економічним ефектом є зниження інвестиційної привабливості територій, падіння вартості нерухомості та зростання експлуатаційних витрат на утримання. Окрім прямих збитків, формуються й опосередковані втрати, пов'язані з перебоями у роботі підприємств, зниженням продуктивності земель, погіршенням умов господарської діяльності та необхідністю впровадження систем моніторингу, захисних і превентивних заходів. У сукупності, це призводить до перерозподілу фінансових ресурсів з розвитку територій на ліквідацію наслідків деформацій і підтримання їх функціональної придатності (Yi L. et al., 2010).

Таким чином, економічні наслідки осідання слід розглядати не лише як потенційні ризики, а як процеси, що вже формують суттєве навантаження на господарські системи різних країн. Це підтверджується глобальними оцінками масштабу проблеми і конкретними прикладами фінансових втрат. Зони з високою та дуже високою ймовірністю осідання займають близько 2,2 млн км² (1,6% суходолу). У цих районах проживає приблизно 1,2 млрд осіб, що відповідає 19% населення світу, а обсяг ВВП, який підпадає під ризик, становить близько 9,78 трлн дол. США, або приблизно 21% світового ВВП (Herrera et al., 2020). Реальні масштаби економічних наслідків осідання підтверджуються прикладами окремих країн, де відповідні втрати вже отримали кількісну оцінку. Так, у Нідерландах, щорічні витрати пов'язані з осіданням територій оцінюються до 3,5 млрд євро. До них належать витрати на підтримання експлуатаційної придатності існуючих будівель та інженерної інфраструктури, а також додаткові витрати на підготовку основ і будівництво нових споруд у складних ґрунтових умовах (Hofmann et al., 2022). У Китаї осідання територій щороку спричиняє прямі економічні втрати понад 7,5 млрд юанів, причому, в окремих містах масштаби збитків є особливо значними -наприклад, у Шанхаї вони оцінюються у 35,1 млрд доларів США (Tok, 2013; Ao et al., 2024). У Каліфорнії, пошкодження каналів і гідроспоруд внаслідок осідань, викликало витрати на окремі ремонтні роботи приблизно у 32 млн доларів США, тоді як повне відновлення головного водопостачального каналу оцінюється близько 3 млрд доларів (Austin, 2025).

Планування стратегій мінімізації ризиків враховує також соціальні фактори. Деформації споруд становлять безпосередню та багатовимірну загрозу життю і здоров'ю населення. Найбільш критичним проявом є прямий інженерний ризик, пов'язаний із частковими або повними обвалами будівель унаслідок просідання фундаментів чи зсувних процесів у ґрунті. У щільно забудованих міських районах такі події можуть призводити до значної кількості травм і людських жертв, а також до вимушеного закриття житлових і громадських будівель через втрату їх експлуатаційної придатності (Ohenhen & Shirzaei, 2022). Деформації об'єктів транспортної інфраструктури -автомобільних доріг, мостів, тунелів і залізничних колій -формують окрему групу ризиків. Пошкодження таких споруд безпосередньо підвищують імовірність транспортних аварій, сходження поїздів з колії, локальних руйнувань мостових конструкцій і порушення функціонування транспортних мереж, що може спричинити збої у ланцюгах постачання (Sheng et al., 2025).

Прикладом соціальних наслідків є інцидент в місті Масейо (Бразилія), де внаслідок осідань, викликаних видобутком кам'яної солі, понад 14 000 об'єктів, зокрема: житлові будинки, підприємства, церкви та школи, були визнані непридатними для проживання у п'яти районах. Понад 60 000 мешканців були змушені покинути свої домівки. Більше ніж 4 500 людей втратили свій бізнес. Тисячам довелося шукати альтернативну роботу, школи, спортивні клуби та медичні заклади (Speetjens, 2024).

З екологічної точки зору, доцільність стратегій мінімізації ризиків обумовлена значною кількістю середньо та довгострокових впливів деформацій на навколишнє середовище. Передусім, осідання змінюють гідрографію території: навіть незначні коливання висоти поверхні впливають на ухили, від яких залежить рух води, тому можуть змінюватися напрями течії річок, каналів і поверхневого стоку (Simeoni et al., 2017). У понижених ділянках вода затримується, формуються локальні зони підтоплення і заболочення, а дренажні споруди втрачають ефективність (Navarro-Hernández et al., 2023). У масштабі басейнів це може змінювати режим повеней, розподіл водних ресурсів і взаємодію між річками, поверхневим стоком та підземними водами, оскільки ущільнення ґрунтів зменшує ємність водоносних горизонтів і погіршує їх поповнення (Smith & Majumdar, 2020). Нерівномірне просідання також сприяє утворенню тріщин, які порушують природний стік і створюють нові шляхи швидкого проникнення води вглиб ґрунту, додатково ускладнюючи водний режим території (Li et al., 2025). Також осідання впливають на ґрунтове середовище: ущільнення зменшує пористість і доступ повітря з водою до кореневої системи, що обмежує розвиток рослин і знижує ефективність засвоєння поживних елементів (Shaheb et al., 2021; Lipiec et al., 2003). У торфових ґрунтах пониження рівня ґрунтових вод активізує окиснення органічної речовини і втрату гумусу, що зменшує водоутримувальну здатність та стійкість ґрунту до посух (Massop et al., 2024). У прибережних районах осідання може супроводжуватися засоленням, проникненням морської води або капілярним підйомом солей, що погіршує водно-фізичні властивості ґрунтів і пригнічує рослинність (de Louw et al., 2018). Одночасно змінюються умови існування ґрунтових мікроорганізмів, що порушує процеси мінералізації органіки, фіксації азоту та формування родючості (Massop et al., 2024). Додатковим екологічним чинником є ризики хімічного забруднення: деформації промислових споруд, трубопроводів і резервуарів можуть спричиняти витoki небезпечних речовин, які забруднюють ґрунти, підземні води й атмосферу, посилюючи деградацію природних екосистем (Priyanka & Thangavel, 2020).

Наприклад, у 2012 році в районі Байю-Корн (штат Луїзіана, США) внаслідок руйнування підземної соляної каверни, створеної під час видобутку розсолу компанією, відбулося обвалення частини соляного купола Наполеонвілл, що спричинило техногенно-індуковані сейсмічні поштовхи та подальше формування карстової воронки площею до 37 акрів. Руйнування стінки каверни, пробуреної занадто близько до периферії купола, призвело до втрати геомеханічної стійкості та просідання навколишніх порід, що супроводжувалося масовим вивільненням метану, природного газу, розсолу та сирої нафти. Внаслідок осідання було знищено значні площі болотних екосистем, порушено гідрологічний режим території, зафіксовано дегазацію ґрунтів і забруднення поверхневих та підземних вод вуглеводнями. Тривале виділення метану створювало ризик вибухів і спричинило токсичне навантаження на довкілля (Hall et al., 2024). Також у Рурському регіоні (Німеччина), тривалий підземний видобуток вугілля спричинив масштабне техногенне осідання поверхні. Після вилучення вугілля підземні порожнини обвалювалися, і земля поступово просідала, місцями до кількох десятків метрів. Це призвело до зміни рельєфу, порушення природного стоку річок, утворення заболочених ділянок та озер. Значна частина території сьогодні потребує постійного відкачування води, і без роботи насосних станцій можливе затоплення великих площ (Harnischmacher, 2010).

Оцінювання соціально-економічних та екологічних ризиків осідання споруд базується на комплексі методів, кожен з яких відображає різні аспекти впливу. Метод Монте-Карло (Monte Carlo simulation) застосовується для моделювання варіацій параметрів геотехнічного середовища та визначення ймовірності розвитку небезпечних деформацій, тоді як матриця ризику (Risk Matrix) дозволяє співставити ймовірність виникнення осідання з тяжкістю його наслідків. Індексні методи (Risk Indices) забезпечують узагальнення впливу геологічних, гідрогеологічних і техногенних факторів у вигляді інтегрального показника, а

багатокритеріальний аналіз (Multi-Criteria Decision Analysis) дає змогу врахувати технічні, економічні та екологічні наслідки.

Для аналізу причин осідання застосовуються аналіз причинно-наслідкових зв'язків (Fault Tree Analysis) і аналіз можливих порушень та їх наслідків (Failure Mode and Effects Analysis), які дозволяють виявити ключові фактори та оцінити їх критичність. Водночас аналіз дерева подій (Event Tree Analysis) і сценарний аналіз (Scenario Analysis) використовуються для моделювання розвитку процесу та його можливих наслідків, а аналіз витрат і вигод (Cost–Benefit Analysis) - для обґрунтування доцільності заходів зі зниження ризику (ISO/IEC 31010, 2009). Важливим етапом є просторова інтерпретація отриманих результатів. У цьому контексті геоінформаційні системи (ГІС) використовуються для інтеграції даних і візуалізації ризиків у вигляді тематичних карт, що дозволяє відобразити зони підвищеної небезпеки та врахувати територіальну неоднорідність факторів осідання (Esmatkahh Irani A. et al., 2022).

Оцінювання ризиків осідань територій і деформацій споруд тісно пов'язане з моніторингом, який забезпечує вихідні дані та уточнення параметрів ризику. Зокрема, оцінка ризиків базується на використанні систем моніторингу як одного з ключових інструментів виявлення та контролю небезпечних деформаційних процесів. Їх необхідність обумовлена тим, що осідання, як правило, розвиваються поступово, і саме раннє виявлення прискорення деформацій дозволяє вчасно застосувати інженерні заходи, уникнути аварій та мінімізувати витрати на відновлення. Систематичні спостереження за осіданнями сприяють раціональному використанню підземних вод і корисних копалин, запобігають деградації ґрунтів, порушенню гідрологічного режиму та пошкодженню інженерних мереж (Yi X. et al., 2025).

Завдяки цьому моніторинг відіграє важливу роль у збереженні екологічної рівноваги, підтриманні стабільності урбанізованих територій і зниженні економічних втрат. Наприклад, витрати на впровадження систем моніторингу на етапі будівництва та оснащення об'єкта, як правило, не перевищують 0,1% його загальної вартості, тоді як зниження витрат на експлуатацію та ремонт оцінюється в межах 0,2–1,5%. У грошовому вираженні це може відповідати економії в кілька мільйонів євро протягом усього строку служби споруди.

Крім того, використання систем моніторингу зменшує ймовірність виникнення позапланових ремонтів і втрати працездатності об'єкта, що додатково сприяє скороченню витрат на його утримання (Martinez-Luengo & Shafiee, 2019).

Таким чином, аргументи на користь впровадження моніторингу мають чітке практичне підтвердження. Узагальнення реальних кейсів, які демонструють результати і практичне значення моніторингу (табл. 1).

Таблиця 1. Узагальнення результатів моніторингу осідань і деформацій у наукових джерелах

№	Об'єкт/ територія	Характер деформації прояву	Результати та практичне значення моніторингу
1	Прибережне місто Чжухай Китай	Масштабне осідання території, через слабкі ґрунти, водовідбір і урбанізацію	<u>InSAR-аналіз дозволив визначити просторово-часові характеристики та чинники процесу осідання, що стало основою для оцінки ризиків, міського планування та розроблення запобіжних заходів [H. Sun et al. 2023]</u>
2	Карагандинський вугільний басейн, Казахстан	Зафіксовані масштабні осідання, пов'язані видобутком, із сумарними зміщеннями понад 700–800 мм. і швидкостями до >500 мм/рік	<u>Моніторинг дозволив визначити динаміку та стадії розвитку осідань, а також підтвердити зв'язок деформацій із гірничими роботами; отримані дані використовуються для оцінки геотехнічних ризиків, планування використання територій і обґрунтування необхідності безперервного моніторингу [A. Satbergenova et al. 2025]</u>

3	Проект реконструкції у Лондоні	Вертикальні осідання, горизонтальні зміщення	<u>Застосування автоматизованих тахеометрів, GNSS, лазерного сканування та бездротових датчиків нахилу забезпечило раннє виявлення критичних деформацій і запобігання пошкодженню історичних будівель та тунелів [A. Milinković et al. 2025]</u>
№	Об'єкт/територія	Характер прояву деформації	Результати та практичне значення моніторингу
4	King's Bridge Белфаст	Незадовільна оцінка за результатами інспекцій; запланована реконструкція	<u>Моніторинг із застосуванням геотехнічних датчиків та аналізу даних підтвердив придатність до експлуатації; скасовано реконструкцію (~£10 млн. економії), уникнуто закриття транспортної артерії, збережено історичний об'єкт [A. Marshall et al. 2020]</u>
5	Басейн р. Сегура, регіон Мурсія Іспанія	Під час посух надмірне водовідкачування спричинило осідання до 8 см. і пошкодження будівель; збитки - близько 50 млн €	<u>Супутниковий моніторинг дозволив ідентифікувати зони осідання, встановити зв'язок між водовідкачуванням і деформаціями та запобігти подальшим пошкодженням, забезпечивши економічний ефект 31,7–71,8 млн € на рік [L. Mamais et al. 2020]</u>
6	Транспортні вузли Тенсберг, Фредрікстад, Норвегія	Повільні осідання спричинили деформації інфраструктури та ремонтні витрати (~€1,5 млн. у Тенсберзі)	<u>Sentinel-1 InSAR забезпечив локалізацію зон деформацій і врахування ризиків на етапах планування та експлуатації; економічний ефект -€3,8–8,7 млн/рік [G. Sawyer et al. 2020]</u>
7	Інженерні комунікації Роттердам та Гауда, Нідерланди	Осідання ґрунтів спричиняє деформації трубопроводів і витoki (~6500 випадків/рік)	<u>Моніторинг дозволив виявити зони активних деформацій і перейти до адресного планування заміни трубопроводів, що зменшило аварії та неефективні ремонти й забезпечило економічний ефект €6,6–7,9 млн/рік з потенціалом €15,2–18,3 млн/рік при масштабуванні на всю країну [G. Sawyer et al. 2016]</u>
8	Тяньцзянь, провінція Сичуань, Китай	Повзучі деформації схилу, послабленого природними й антропогенними чинниками, спричинили зсув	<u>Моніторинг деформацій дозволив виявити прискорення зсувних процесів і локалізувати нестабільну частину схилу. На основі отриманих даних встановлено 25 протизсувних паль, що стабілізували масив. Це дозволило знизити ризик руйнування житла для 247 мешканців 64 домогосподарств і запобігти економічним втратам, які оцінювалися у понад 12 млн юанів [Zhuo Chen et al. 2018]</u>
9	Лонцзінь, провінція Гуйчжоу, Китай	Підрізання підшви схилу під час розширення дороги, спричинило деформацію масиву та розвиток зсуву.	<u>Моніторинг деформацій із використанням GNSS і датчиків тріщин у системі раннього попередження дозволив зафіксувати прискорення зсувних процесів і своєчасно евакуйовати понад 400 мешканців, що дозволило уникнути людських жертв і значних матеріальних втрат [X. Fan et al. 2019]</u>
10	Брумадіньо, штат Мінас-Жерайс, Бразилія	Накопичення водонасичених гірничих відходів у хвостосховищі Dam I спричинило повзучу деформацію масиву та втрату стійкості дамби.	<u>Ретроспективний аналіз супутникових даних InSAR показав, що ознаки нестабільності дамби можна було виявити за кілька місяців до аварії. Руйнування хвостосховища 25 січня 2019 року призвело до загибелі понад 250 людей і викиду близько 11 млн м³ гірничих відходів, що забруднили річку Парапеба та негативно вплинули на регіональні екосистеми [S. Das et al. 2023]</u>
11	Джакарта, Бандунг і Семаранг, Індонезія	Надмірний відбір підземних вод і урбаністичне навантаження спричинили осідання територій (до 20 см/рік), що підвищило ризик затоплення.	<u>Геодезичний моніторинг деформацій земної поверхні дозволив виявити їхній вплив на розширення зон затоплення та проникнення морської води, що стало основою для заходів із захисту водних ресурсів, запобігання засоленню ґрунтів і збереження прибережних екосистем [H. Z. Abidin et al. 2015]</u>

Моніторинг осідань і деформацій, як показує аналіз міжнародних кейсів, застосовується у різних країнах світу та охоплює широкий спектр інженерних об'єктів. Така географічна і функціональна різноманітність підтверджує універсальність систем спостереження та їхню ключову роль у сучасній інженерній практиці. Узагальнення результатів розглянутих досліджень демонструє значну варіативність проявів деформацій: від інтенсивних вертикальних осідань, що можуть досягати сотень міліметрів на рік (зокрема, у Карагандинському басейні), до горизонтальних зміщень і повзучих процесів, характерних для територій (провінції Сичуань і Гуйчжоу, Китай) та урбанізованих зон із надмірним водовідбором (Індонезія, Іспанія). Регулярні вимірювання, наведені у проаналізованих роботах, дозволяють не лише фіксувати ці зміни, але й виявляти критичні тенденції, оцінювати швидкість розвитку деформацій і прогнозувати їх подальшу динаміку.

Встановлено, що результати моніторингу безпосередньо використовуються для прийняття управлінських рішень. Це проявляється у плануванні використання територій, оцінці ризиків та прийнятті обґрунтованих експлуатаційних рішень. Аналіз результатів, також свідчить про економічну доцільність впровадження моніторингу. У ряді досліджень відзначається, що раннє виявлення небезпечних тенденцій і своєчасне втручання дозволяють уникати значних фінансових втрат, причому оцінений економічний ефект у деяких випадках сягає десятків мільйонів євро або еквівалентних сум у національних валютах. Крім того, розглянуті кейси демонструють важливу роль моніторингу у запобіганні соціальним і екологічним наслідкам. Зокрема, у проектах, реалізованих у Китаї та Індонезії, своєчасні спостереження сприяли зниженню ризиків для населення та мінімізації негативного впливу на прибережні екосистеми.

Таким чином, узагальнення наведених прикладів дозволяє стверджувати, що систематичний моніторинг осідань і деформацій є невід'ємним елементом забезпечення безпеки та ефективного управління інженерними об'єктами, оскільки він забезпечує своєчасне виявлення небезпечних процесів, обґрунтування технічних рішень і зниження як економічних, так і соціально-екологічних ризиків.

У той же час, проблема осідань і пов'язаних із ними збитків поширена у багатьох країнах. Подібні процеси створюють значні ризики, що зумовлює потребу, не лише моніторингу, а й у пошуку ефективних способів реагування. У цьому контексті, доцільно розглянути, як різні країни справляються з наслідками осідань і які рішення застосовують для зменшення ризиків та наслідків (табл. 2).

Таблиця 2. Порівняльний аналіз управління ризиками та наслідками деформацій у різних країнах

Країна	Характеристика деформацій	Наслідки та збитки	Стратегії мінімізації
США/ Долина Сан-Хоакін	За даними супутникової радарної інтерферометрії (InSAR), з 1920-х рр. внаслідок інтенсивного водозабору підземних вод із численних свердловин зафіксовано довготривале осідання земної поверхні, що місцями досягло ~8,5 м. [Stevens et al., 2016]	Деформації будівель, доріг і трубопроводів, пошкодження свердловин і дренажних систем, погіршення роботи гідропоруд і підвищення ризику затоплень. Економічні збитки в окремих регіонах перевищили \$1,3 млрд [M. Lees & R. Knight, 2024].	Запроваджено регуляторні й економічні механізми управління підземними водами (облік і обмеження водовідбору, дозволи на свердловини, плата за видобуток), фінансування ремонту водогосподарської інфраструктури та державні програми сталого управління підземними водами на понад \$800 млн. [Borchers & Carpenter, 2014]
Швеція/ м.Кіруна	За даними супутникового InSAR та GPS-моніторингу зафіксовано вертикальні осідання земної поверхні до ~85 мм., спричинені підземним видобутком залізної руди [K Mäkitäavola et al.]	Витрати на переселення понад \$2.4 млрд; пошкодження лікарень, шкіл і житлової забудови; ~6 000 мешканців підлягають переселенню; загроза традиційному оленярству народу саамі [JP Casey 2019]	Релокація значної частини міста приблизно на 3 км: переміщення окремих історичних будівель і нове будівництво житлової та громадської забудови; компенсації мешканцям (ринкова вартість + ~25% або нове житло); планування з урахуванням зон гірничих деформацій [Isha Chaudhary 2025]

Країна	Характеристика деформацій	Наслідки та збитки	Стратегії мінімізації
Нідерланди/ Гронінген	Компакція газового резервуару через зниження пластового тиску під час видобутку спричинила активізацію ~2500 розломів та індуковані землетруси (до ML 3.6); геодезичний моніторинг зафіксував осідання земної поверхні до ~40–50 см [I. E. Bal et al.]	Пошкодження житлових будинків і тріщини у кладці; понад 100 тис. заяв на компенсацію (€1,17 млрд); зниження вартості нерухомості та соціальна напруга [I. E. Bal et al.].	Скорочення видобутку газу та поступове закриття родовища; компенсації населенню за пошкодження і втрату вартості житла; посилення відповідальності оператора; створення органів оцінки збитків; сейсмічний і інженерний моніторинг будівель та деформацій [I. E. Bal et al.]
Німеччина/ Рурський басейн	Інтенсивний підземний видобуток вугілля спричинив значні осідання; геодезичне порівняння історичних топографічних карт (1892 р.) із сучасними цифровими моделями рельєфу зафіксувало локальні осідання понад 25 м. і середнє зниження близько 1,6 м. [S. Harnischmacher 2010]	Порушення природного дренажу та зміна напрямків течії річок; утворення знижених ділянок рельєфу, заболочених територій і техногенних озер; пошкодження будівель, доріг і інженерних мереж; підвищений ризик підтоплення урбанізованих територій [S. Harnischmacher 2010]	Закриття шахт і припинення видобутку вугілля; підтримання систем штучного водовідведення та насосних станцій для запобігання затопленню; рекультивація територій просідання та перетворення колишніх гірничих ландшафтів на природоохоронні й рекреаційні зони [S. Harnischmacher 2010].
Китай / м. Шанхай	Інтенсивний відбір підземних вод спричинив значні осідання поверхні: у період пікової експлуатації водоносних горизонтів річні осідання досягали ~105 мм, а сумарне осідання в урбанізованій частині - до ~2.6 м [T. Yang et al. 2020; Xi-Cun He et al. 2019]	Пошкодження будівель і транспортно-підземної інфраструктури та підвищило ризик прибережних затоплень, проникнення морської води й міського підтоплення, що посилюється підвищенням рівня моря [Xi-Cun He et al. 2019]	Обмежено відбір підземних вод (з ~200 млн т/рік до <10 млн т/рік), заборонено їх використання в районах централізованого водопостачання, запроваджено штучне поповнення водоносних горизонтів і зонування контролю осідань, що дозволило зменшити їх темпи до ~5–6 мм/рік [T. Yang et al. 2020; Xi-Cun He et al. 2019]
Індія/ Джошіматх	Осідання спричинене розташуванням міста на давніх зсувних відкладах, урбанізацією, відбором підземних вод, а також будівництвом тунелів і буровибуховими роботами під час їх проходки. За даними супутникового моніторингу Sentinel-1 швидкість осідання становить ~60–94 мм/рік [S. Awasthi et al. 2024]	Тріщини в дорогах і будівлях, пошкодження понад 868 споруд, часткове руйнування житлових будинків, евакуацію мешканців і порушення роботи транспортної та комунальної інфраструктури. Також відзначено дестабілізацію схилів, активізацію зсувів і порушення водного режиму [S. Awasthi et al. 2024; N. Dolma et al. 2025].	Запроваджено обмеження забудови та контроль урбанізації у нестійких зонах, регулювання відбору підземних вод, розроблення програм переселення населення з небезпечних територій і посилення державного контролю за реалізацією великих будівельних проектів. Також передбачено заходи з відновлення водного режиму та раціонального управління водними ресурсами [N. Dolma et al. 2025]
Україна/ Кривбас	Інтенсивний видобуток залізної руди спричинив масштабні деформації поверхні з формуванням кар'єрних порожнин і зон провалів: близько 17 кар'єрів (12–643 га, до ~400 м глибини) із сумарним об'ємом понад ~4.5 млрд. м ³ . та ~15 провальних зон глибиною до ~285 м. [O. Bazaluk et al. 2024]	Формуються провальні кратери й зони осідання, руйнуються будівлі, дороги та інженерні мережі, відбувається заболочення і деградація ґрунтів. Порушено близько 49% території міста; 6900 га. займають відвали, 6530 га. хвостосховища з мільярдами тонн гірничих відходів [O. Bazaluk et al. 2024]	У регіоні реалізуються заходи рекультивації порушених земель і екологічні програми реабілітації територій, спрямовані на відновлення поверхні та управління гірничими відходами. Додатково пропонується застосування технології закладки виробленого простору з використанням відходів збагачення для заповнення техногенних порожнин і стабілізації масиву порід [O. Bazaluk et al. 2024]

Виходячи з порівняльного аналізу, найбільш системними прикладами управління ризиками техногенних деформацій є Нідерланди та Німеччина. У Рурському басейні сформована довгострокова модель управління пост-гірничими територіями, що поєднує закриття шахт, підтримання систем штучного водовідведення, рекультивацію та перепрофілювання гірничих ландшафтів, а також постійний геодезичний і супутниковий моніторинг деформацій. У Гронінгені реакція на індуковані землетруси та осідання включала не лише скорочення видобутку газу, а й зміни законодавства, створення спеціалізованих інституцій для оцінки збитків і масштабні компенсаційні виплати населенню. Спільною рисою обох випадків є поєднання технічного контролю, правової відповідальності оператора та прозорих механізмів відшкодування збитків.

Окремим прикладом є шведське місто Кіруна, де у відповідь на незворотні гірничі деформації було реалізовано рішення про планомірне перенесення частини міської забудови. Попри значні економічні витрати, цей підхід дозволив системно врахувати зони гірничих деформацій, забезпечити компенсації мешканцям і сформувати нову структуру міського простору з урахуванням довгострокових геологічних ризиків. Водночас підходи Китаю та США демонструють різні, але ефективні моделі реагування: у Шанхаї проблема осідання вирішується через жорстке державне регулювання відбору підземних вод, штучне поповнення водоносних горизонтів та зонування територій за рівнем ризику, тоді як у США застосовується модель поєднання державного регулювання з економічними інструментами управління водними ресурсами, включаючи систему дозволів, облік водовідбору та інвестиції у модернізацію інфраструктури.

Натомість, у випадках Індії (Джошіматх) та України (Кривбас), переважають фрагментарні заходи реагування, що мають локальний характер і не формують цілісної системи управління: обмеження забудови, рекультивація порушених земель і заходи з переселення населення виконуються окремо та без належної інтеграції у довгострокову стратегію. Особливої актуальності ця проблема набуває для Криворізького басейну, де техногенними процесами порушено майже половину міської території, що потребує довгострокової стратегії управління гірничими ландшафтами та контролю деформацій.

Загалом, міжнародний досвід свідчить, що універсальних стратегій управління процесами осідання у зонах техногенного впливу не існує, оскільки їх прояви та масштаби значною мірою залежать від природних умов, типу господарської діяльності та особливостей урбанізованих територій. Водночас, у практиці різних країн сформувався певний набір інструментів і підходів, які дозволяють ефективніше виявляти деформаційні процеси, оцінювати їх наслідки та зменшувати пов'язані з ними ризики. Важливою спільною складовою таких підходів є систематичний моніторинг стану територій, який забезпечує своєчасне виявлення змін, формує інформаційну основу для аналізу розвитку деформацій і дозволяє обґрунтовано обирати та коригувати стратегії управління. Також, ключовими елементами таких підходів є чітке визначення відповідальності суб'єктів господарської діяльності за наслідки техногенного впливу, прозорі механізми компенсації збитків населенню, а також довгострокові програми відновлення та рекультивації порушених територій. З урахуванням міжнародного досвіду, для України актуальним є формування комплексної системи управління техногенними деформаціями, що поєднуватиме удосконалення нормативно-правового регулювання, економічні механізми відшкодування збитків та впровадження сучасних систем моніторингу стану територій. Важливими напрямками також є запровадження фінансових гарантій відновлення порушених територій і створення ефективних механізмів компенсації для громад, що зазнають впливу таких процесів.

Висновки. Проведене аналітичне дослідження показало, що осідання земної поверхні та пов'язані з ними деформації споруд є поширеним наслідком техногенного впливу і формують значні соціально-економічні та екологічні ризики для урбанізованих територій. Встановлено, що антропогенні чинники є домінуючими у формуванні сучасних процесів осідання, а їхні

наслідки проявляються у пошкодженні будівель та інженерної інфраструктури, зниженні вартості нерухомості, перебоях у господарській діяльності, а також у зміні гідрологічного режиму, деградації ґрунтів і забрудненні природного середовища. Наукова новизна дослідження полягає в узагальненні економічних, екологічних і соціальних наслідків техногенних деформацій у єдиному аналітичному контексті, а також у систематизації сучасних методів оцінки ризиків осідання територій і деформацій споруд та визначенні ролі геодезичного і супутникового моніторингу як ключового інструменту їх аналізу та контролю. Показано, що систематичні спостереження за деформаціями у поєднанні з використанням методів оцінки ризиків дозволяють переходити від реагування на наслідки до їх прогнозування та превентивного управління, що зменшує економічні втрати і підвищує безпеку урбанізованих територій. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання узагальненого міжнародного досвіду та систематизованих підходів до оцінки ризиків для формування комплексної системи управління техногенними деформаціями в Україні.

Заява про конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Список використаних джерел.

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T. P., Gamal, M., 2015. Environmental Impacts of Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia. *FIG Working Week 2015: From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World*, Sofia, Bulgaria, 17–21 May 2015.
- Ao, Z., Hu, X., Tao, S., Hu, X., Wang, G., Li, M., Wang, F., Hu, L., Liang, X., Xiao, J., Yusup, A., Qi, W., Ran, Q., Fang, J., Chang, J., Zeng, Z., Fu, Y. H., Xue, B., Wang, P., Zhao, K., Li, L., Li, W., Li, Y., Jiang, M., Yang, Y., Shen, H., Zhao, X., Shi, Y., Wu, B., Yan, Z., Mengjia, W., Su, Y., Hu, T., Ma, Q., Bai, H., Wang, L., Yang, Z., Feng, Y., Danhua, Z., Huang, E., Pan, J., Ye, H., Yang, C., Qin, Y., He, C., Guo, Y., Cheng, K., Ren, Y., Yang, H., Zheng, C., Zhu, J., Wang, S., Ji, C., Zhu, B., Liu, H., Tang, Z., Wang, Z., Zhao, S., Tang, Y., Xing, H., Guo, Q., Liu, Y., Fang, J., 2024. A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities. *Science*, 384(6693), 301–306. Retrieved from <https://doi.org/10.1126/science.adl4366>
- Austin, C., 2025. Metropolitan Imported Water Subcommittee: California Aqueduct repairs – Billions needed to fix subsidence. *Maven's Notebook*. Retrieved from <https://mavensnotebook.com/2025/07/02/california-aqueduct-repairs-billions-needed-to-fix-subsidence/>
- Awasthi, S., Jain, K., Sahoo, S., Kumar, R., Goswami, A., Joshi, G. C., Kulkarni, A. V., Srivastava, D. C., 2024. Analyzing Joshimath's sinking: causes, consequences, and future prospects with remote sensing techniques. *Scientific Reports*, 14, 10876. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61540-1>
- Bal, I. E., Smyrou, E., Bulder, E., 2019. Liability and Damage Claim Issues in Induced Earthquakes: Case of Groningen. *Proceedings of the Conference*, Greenwich, London, 9–10 September 2019.
- Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Sai, K., Chebanov, M., Lozynskyi, V., 2024. Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: case study of Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*, 12. Retrieved from <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344>
- Borchers, J. W., Carpenter, M., Kretsinger Grabert, V., Dalgish, B., Cannon, D., 2014. *Land Subsidence from Groundwater Use in California*. California Water Foundation, Summary Report. Retrieved from <https://cawaterlibrary.net/wp-content/uploads/2017/09/1397858037-SubsidenceShortReportFINAL00248030xA1C15.pdf>
- Casey, J. P., 2019. Moving a town to save a mine: the story of Kiruna. *Mining Technology*. Retrieved from <https://www.mining-technology.com/features/moving-a-town-to-save-a-mine-the-story-of-kiruna/>
- Chaudhary, I., 2025. Swedish Church Relocated in One Piece to Escape Expanding Iron Mine. *The Pinnacle Gazette*. Retrieved from <https://pinnaclegazette.com/sweden-church-relocated-kiruna-mine/>
- Chen, Z., Song, D., Dong, L., 2021. Characteristics and emergency mitigation of the 2018 Laochang landslide in Tianquan County, Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 11, 1578. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81105-1>

- Das, S., Priyadarshana, A., Grebby, S., 2023. Monitoring the risk of a tailings dam collapse through spectral analysis of satellite InSAR time-series data. *arXiv preprint*. Retrieved from <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.00781>
- de Louw, P. G. B., Bootsma, H., Kooi, H., Kramer, M., Erkens, G., 2018. Land subsidence by peat oxidation leads to enhanced salinization through boils in Dutch polders. *E3S Web of Conferences*, 54, 00007. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185400007>
- Dolma, N., Tiyasha, T., Singh, A., 2025. A case study on land subsidence occurrence in Joshimath, Uttarakhand. *Discover Geoscience*, 3, 92. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00092-5>
- Fan, X., Xu, Q., Liu, J., Siva Subramanian, S., He, C., Xing, Z., Zhou, L., 2019. Successful early warning and emergency response of a disastrous rockslide in Guizhou province, China. *Landslides*, 16(12). Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01269-6>
- Esmatkhan Irani, A., Azadi, A., Nikbakht, M., Azarafza, M., Hajjalilue Bonab, M., Behrooz Sarand, F., 2022. GIS-based settlement risk assessment and its effect on surface structures: A case study for the Tabriz metro—line 1. *Geotechnical and Geological Engineering*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02201-x>
- Hall, C. M., 2024. An Ominous Effervescence: The Bayou Corne sinkhole. *64 Parishes*. Retrieved from <https://64parishes.org/an-ominous-effervescence-the-bayou-corne-sinkhole>
- Harnischmacher, S., 2010. Quantification of mining subsidence in the Ruhr District (Germany). *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 16(3), 261–274. Retrieved from <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7965>
- He, X.-C., Yang, T.-L., Shen, S.-L., Xu, Y., Arulrajah, A., 2019. Land Subsidence Control Zone and Policy for the Environmental Protection of Shanghai. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(15), 2729. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ijerph16152729>
- Herrera, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Bejar, M., Lopez-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D. L., Hung, W.-C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wan, H., Ye, S., 2020. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34–36. Retrieved from <https://doi.org/10.1126/science.abb8549>
- Hofmann, L., Dröes, M. I., Francke, M. K., 2025. Sinking Land, Sinking Prices? Land Subsidence, Flood Risk, and Property Prices. *Tinbergen Institute Discussion Paper* TI 2025-040/IV. Tinbergen Institute, Amsterdam–Rotterdam. Retrieved from <https://papers.tinbergen.nl/25040.pdf>
- Huning, L. S., Love, C. A., Anjileli, H., Vahedifard, F., Zhao, Y., Chaffe, P. L. B., Cooper, K., Alborzi, A., Pleitez, E., Martinez, A., Ashraf, S., Mallakpour, I., Mofitakhari, H., AghaKouchak, A., 2024. Global Land Subsidence: Impact of Climate Extremes and Human Activities. *Reviews of Geophysics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2023RG000817>
- International Electrotechnical Commission, 2009. IEC/FDIS 31010 Risk management -Risk assessment techniques. [Risk management -Risk assessment techniques]. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- Lees, M., Knight, R., 2024. Quantification of record-breaking subsidence in California's San Joaquin Valley. *Communications Earth & Environment*, 5, 677. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01704-8>
- Li, S., Guo, N., Li, W., Li, D., Ma, W., Zheng, C., Fang, J., 2025. Numerical Simulation on the Response Mechanism of Soil Water Migration to Mining Subsidence Cracks. *Water*, 17(22), 3247. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/w17223247>
- Lipiec, J., Medvedev, V. V., Birkas, M., Dumitru, E., Lyndina, T. E., 2003. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International Agrophysics*, 17(2).
- Makitaavola, K., Stockel, B.-M., Savilahti, T., Sjöberg, J., Dudley, J., McParland, M. A., Morin, R., 2018. InSAR as a practical tool to monitor and understand large-scale mining-induced ground deformations in a caving environment. In: Potvin, Y., Jakubec, J. (Eds.), *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 661–674. Retrieved from https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_51_Sjöberg
- Marshall, A., Taylor, S., Lydon, M., 2020. A Data Analytics Driven Smart Alerting System for Structural Health Monitoring. *Impact Case Study (REF3)*, *Queen's University Belfast*. Retrieved from <https://results2021.ref.ac.uk/impact/dcf316cc-2925-4a1f-9658-64499c339a82?page=1>

- Massop, H. T. L., Hessel, R., van den Akker, J. J. H., van Asselen, S., Erkens, G., Gerritsen, P. A., Gerritsen, F. H. G. A., 2024. Monitoring long-term peat subsidence with subsidence platens in Zegveld, The Netherlands. *Geoderma*, 450, 117039. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117039>
- Martinez-Luengo, M., Shafiee, M., 2019. Guidelines and Cost-Benefit Analysis of the Structural Health Monitoring Implementation in Offshore Wind Turbine Support Structures. *Energies*, 12(6), 1176. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en12061176>
- NASA Earth Observatory, 2017. San Joaquin Valley is Still Sinking. Retrieved from <https://earthobservatory.nasa.gov/images/90368/san-joaquin-valley-is-still-sinking>
- Navarro-Hernández, M. I., Valdes-Abellan, J., Tomás, R., Tessitore, S., Ezquerro, P., Herrera, G., 2023. Analysing the Impact of Land Subsidence on the Flooding Risk: Evaluation Through InSAR and Modelling. *Water Resources Management*, 37, 4363–4383. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03563-1>
- Ohenhen, L. O., Shirzaei, M., 2022. Land Subsidence Hazard and Building Collapse Risk in the Coastal City of Lagos, West Africa. *Earth's Future*, 10(12), e2022EF003219. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2022EF003219>
- Oligschläger, C., Mamais, L., Khabarov, N., 2020. Aquifer Management in Spain. *Sentinels Benefits Study (SeBS) – Case Study Report*. European Association of Remote Sensing Companies (EARSC), European Space Agency (ESA). Retrieved from https://earsc.org/sebs/wp-content/uploads/2020/10/Aquifer-Management-in-Spain_vf.pdf
- Priyanka, E. B., Thangavel, S., 2020. Environmental Impacts and its Concerns due to Accidents in Oil & Gas Pipelines around India – A Minireview. *Journal of Atmospheric & Earth Science*, 4, 015. Retrieved from <https://doi.org/10.24966/AES-8780/100015>
- Satbergenova, A., Talgarbayeva, D., Vilayev, A., Urazaliyev, A., Yelisseyeva, A., Kaldybayev, A., Gavruk, S., 2025. InSAR-Based Assessment of Land Subsidence Induced by Coal Mining in Karaganda, Kazakhstan. *Geomatics*, 5(4), 55. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/geomatics5040055>
- Sawyer, G., Boyle, D., Khabarov, N., 2020. Ground Motion Monitoring in Norway. *Sentinels Benefits Study (SeBS) – Case Study Report*. European Association of Remote Sensing Companies (EARSC), European Space Agency (ESA). Retrieved from <https://earsc.org/sebs/wp-content/uploads/2020/07/Ground-Movement-Monitoring-in-Norway-final.pdf>
- Sawyer, G., Dubost, A., de Vries, M., 2016. Pipeline Infrastructure Monitoring in the Netherlands. *Copernicus Sentinels' Products Economic Value: Case Study Report*. European Association of Remote Sensing Companies (EARSC), European Space Agency (ESA). Retrieved from <https://earsc.org/sebs/wp-content/uploads/2019/03/Infrastructure-monitoring-Netherlands-Full-case.pdf>
- Shaheb, M. R., Venkatesh, R., Shearer, S. A., 2021. A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *Journal of Biosystems Engineering*, 46, 417–439. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00123-y>
- Sheng, F., Chai, L., Zhang, X., Wu, J., Ma, L., Geng, K., Han, Q., Xie, X., Zeng, X., 2025. Ground subsidence monitoring and analysis of Lairong railway during its entire construction cycle based on SBAS-InSAR. *Scientific Reports*, 15, 36838. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41598-025-36838-0>
- Simeoni, U., Tessari, U., Corbau, C., Tosatto, O., Polo, P., Teatini, P., 2017. Impact of land subsidence due to residual gas production on surficial infrastructures: The Dosso degli Angeli field study (Ravenna, Northern Italy). *Engineering Geology*, 229. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.09.008>
- Smith, R. G., Majumdar, S., 2020. Groundwater Storage Loss Associated With Land Subsidence in Western United States Mapped Using Machine Learning. *Water Resources Research*. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2019WR026621>
- Speetjens, P., 2024. In Brazil, half a century of salt mining sinks a city, displacing thousands. *Mongabay*. Retrieved from <https://news.mongabay.com/2024/05/in-brazil-half-a-century-of-salt-mining-sinks-a-city-displacing-thousands/>
- Sun, H., Peng, H., Zeng, M., Wang, S., Pan, Y., Pi, P., Xue, Z., Zhao, X., Zhang, A., Liu, F., 2023. Land Subsidence in a Coastal City Based on SBAS-InSAR Monitoring: A Case Study of Zhuhai, China. *Remote Sensing*, 15(9), 2424. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs15092424>
- Tok, X., 2013. Sinking Cities: Cracks in the Ground. *CWR – Risk Rethink Resilience*. Retrieved from <https://cwrrr.org/opinions/sinking-cities-cracks-in-the-ground/>

- Yang, T., Yan, X., Huang, X., Wu, J., 2020. Integrated management of groundwater exploitation and recharge in Shanghai based on land subsidence control. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 831–836. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/piahs-382-831-2020>
- Yi, L., Wang, J., Shao, C., Guo, J.-W., Jiang, Y., Liu, B., 2010. Land Subsidence Disaster Survey and Its Economic Loss Assessment in Tianjin, China. *Natural Hazards Review*, 11(1), 35–41. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2010\)11:1\(35\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2010)11:1(35))
- Yi, X., Wang, L., Ci, H., Wang, R., Yang, H., Yan, Z., 2025. Monitoring of Land Subsidence and Analysis of Impact Factors in the Tianshan North Slope Urban Agglomeration. *Land*, 14(1), 202. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/land14010202>