

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ У ГІРНИЧОДОБУВНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Анотація. У статті розглянуто можливості застосування сучасних методів дистанційного зондування Землі для моніторингу гірничодобувних територій та оцінки екологічних ризиків в умовах обмеженого доступу. Особливу увагу приділено комплексному використанню оптичних і радарних супутникових даних та аналізу часових рядів спостережень. На прикладі Щербаківського хвостосховища проаналізовано особливості його структурної організації та виявлено ознаки фільтраційних процесів і можливих витоків на прилеглі території. Показано, що застосування індексу вологості SMI на основі температурних даних Landsat-8 дозволяє ідентифікувати зони підвищеного зволоження. Обґрунтовано, що використання супутникових підходів забезпечує підвищення оперативності та достовірності екологічного моніторингу.

Ключові слова: супутниковий моніторинг, дистанційне зондування, хвостосховища, гірничодобувна промисловість, екологічні ризики, індекс SMI, радарні та оптичні дані.

Вступ. Україна посідає одне з провідних місць в Європі за мінерально-сировинним потенціалом. На території країни зосереджено понад 20 тисяч родовищ, що охоплюють близько 97 видів мінеральної сировини. У зв'язку з цим гірничодобувна промисловість виступає одним із ключових секторів національної економіки, відіграючи важливу роль у забезпеченні ресурсної незалежності держави. Водночас такий масштаб освоєння надр супроводжується істотним техногенним навантаженням на навколишнє середовище. Інтенсивна експлуатація родовищ призводить до значних змін природних ландшафтів, деградації земельних ресурсів та накопичення значних обсягів відходів гірничого виробництва. У результаті формуються складні техногенні об'єкти, зокрема хвостосховища, відвали та кар'єри, які в багатьох випадках виступають джерелами потенційної екологічної небезпеки, забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод.

В умовах повномасштабної війни функціонування цієї галузі зазнає суттєвих змін, що супроводжуються зростанням техногенного та екологічного навантаження, а також істотним обмеженням можливостей здійснення належного екологічного контролю на окупованих територіях і в районах активних бойових дій. За оцінками експертів приблизно 30 % підприємств гірничодобувної промисловості знаходяться в окупації або в безпосередній близькості до зони активних бойових дій. Це відчутно обмежує можливості застосування класичних заходів контролю, які базуються на проведенні наземних

обстежень, що в свою чергу ускладнює своєчасне отримання достовірної інформації про стан цих об'єктів. За таких обставин відсутність доступу до територій підприємств фактично унеможливує оперативне реагування на потенційні загрози та підвищує ймовірність розвитку неконтрольованих екологічних процесів. Зазначені явища стали яскравим прикладом низки масштабних екологічних проблем і техногенних ризиків, які за період з 2014 року спостерігаються на тимчасово окупованих територіях Донецької та Луганської областей [1-3].

За таких умов особливої актуальності набуває використання методів дистанційного зондування Землі, які забезпечують можливість отримання об'єктивної та регулярної інформації про стан гірничодобувних територій. Сучасні супутникові системи дозволяють здійснювати моніторинг змін земної поверхні, аналізувати розвиток техногенних процесів і оцінювати екологічні ризики у масштабі як окремих об'єктів, так і регіонів у цілому. Це створює передумови для впровадження автоматизованих підходів до моніторингу гірничодобувної діяльності та підвищення ефективності екологічного контролю в умовах обмеженого доступу до територій

Постановка проблеми. Незважаючи на стрімкий розвиток технологій дистанційного зондування Землі, в Україні на сьогодні не сформовано цілісної інтегрованої системи моніторингу гірничодобувної діяльності, яка б передбачала системне використання супутникових даних. Існуючі підходи характеризуються розрізненістю та обмеженою функціональністю, що не дозволяє забезпечити комплексне й оперативне оцінювання стану техногенно трансформованих територій. Проблема посилюється впливом низки чинників, серед яких ключовими є обмежений доступ до частини територій, зокрема в межах зон воєнних дій, недостатній рівень інтеграції різнорідних джерел даних, а також відсутність ефективних автоматизованих інструментів аналізу змін гірничих ландшафтів. За умов необхідності контролю значних площ це суттєво знижує можливості своєчасного виявлення потенційно небезпечних процесів.

Разом із тим традиційні методи моніторингу, що базуються на наземних вимірюваннях, не відповідають сучасним вимогам за показниками оперативності та ресурсоємності [1-3]. Їх обмежена періодичність не дозволяє адекватно фіксувати динаміку змін, що є критично важливим для об'єктів підвищеної екологічної небезпеки, зокрема хвостосховищ. Для таких об'єктів характерний розвиток прихованих процесів, серед яких деформації, порушення стійкості споруд, фільтраційні явища, підтоплення та зміни режимів функціонування.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження сучасних підходів, що ґрунтуються на використанні супутникових даних і передбачають автоматизований аналіз просторово-часових змін. Це створює передумови для формування систем раннього виявлення небезпечних процесів і забезпечує перехід до більш ефективного та науково обґрунтованого контролю стану гірничодобувних територій.

Мета і завдання дослідження. Метою цього дослідження є узагальнення сучасних підходів до використання супутникових методів моніторингу та обґрунтування доцільності їх застосування для контролю стану гірничодобувних територій України. Особливу увагу приділено супутниковому моніторингу Щербаківського хвостосхови-

ща, як ключового об'єкта дослідження з метою оцінки можливостей виявлення основних чинників його техногенного впливу на навколишнє середовище та прогнозування супутніх екологічних ризиків.

Основна частина. Сучасний етап розвитку методів дистанційного зондування Землі характеризується розширенням можливостей їх застосування для аналізу техногенно трансформованих територій, зокрема у межах гірничодобувних регіонів. Використання супутникових даних забезпечує систематичне та просторово узгоджене спостереження за територіями з інтенсивним техногенним та екологічним навантаженням, формуючи інформаційну основу для оцінювання змін стану довкілля.

Принципово важливим у цьому контексті є поєднання різних типів супутникових даних. Оптичні знімки (Landsat, Sentinel-2) дозволяють аналізувати структуру земного покриву, стан рослинності та ступінь деградації ґрунтів, тоді як радарні дані Sentinel-1 забезпечують можливість моніторингу незалежно від метеорологічних умов і освітленості. Комплексне використання таких даних створює передумови для безперервного відстеження динаміки техногенних процесів [4].

Ключове значення має аналіз часових рядів супутникових зображень, який дозволяє виявляти розвиток змін, пов'язаних із трансформацією фізичних властивостей поверхні. Зокрема, варіації вологості, порушення ґрунтового покриву та перерозподіл матеріалу відображаються у спектральних і температурних характеристиках, що дає змогу ідентифікувати ділянки потенційного ризику.

Серед об'єктів підвищеної небезпеки особливе місце займають хвостосховища, які є джерелами довготривалого техногенного впливу. Це особливо актуально для уранодобувної промисловості, де у відходах концентруються радіонукліди, важкі метали та токсичні сполуки, здатні до міграції у ґрунтах, підземних і поверхневих водах. У разі порушення цілісності таких об'єктів відбувається поширення забруднюючих речовин на прилеглі території, включаючи сільськогосподарські угіддя, що формує додаткові ризики для екосистем і населення [5-6].

У цьому аспекті показовим є Щербаківське хвостосховище, розташоване на південь від м. Жовті Води. Об'єкт, сформований у природній балці, має складну структуру, що включає стару та нову секції, які відрізняються умовами формування та режимом функціонування. Масштаби даної споруди є значними: вона охоплює площу близько 25 га та містить понад 22 млн м³ накопичених відходів збагачення уранових руд. Розташування об'єкта лише за 1,5 км від житлової забудови міста зумовлює критичну необхідність постійного моніторингу екологічних загроз. Схематичне розташування об'єкта відносно міста та його фактичний вигляд на мультиспектральному знімку Sentinel-2 за вересень 2025 року представлено на рисунку 1. Червоним маркером позначено центр міста, а контуром окреслено межу зони інтересу (ROI) для подальшого аналізу.



Рисунок 1 - Територіальне розташування секцій Щербаківського хвостосховища:
а) OSM карта локації з позначенням меж зони інтересу та центру м. Жовті Води;
б) супутниковий знімок Sentinel-2 від 24 вересня 2025 р.

На основі проведених досліджень встановлено, що для кількісної оцінки фільтраційних процесів та виявлення прихованих зон зволоження найбільш доцільним є використання індексу вологості ґрунту SMI (Soil Moisture Index) [7]. Даний підхід базується на поєднанні температурних характеристик поверхні та вегетаційних показників, що дозволяє нівелювати вплив рослинного покриву при аналізі вологості. У загальному вигляді індекс визначається за формулою:

$$SMI = (LST_{max} - LST) / (LST_{max} - LST_{min}), \quad (1)$$

де LST — температура земної поверхні, отримана за даними теплових каналів супутника Landsat-8; LST_{max} та LST_{min} — граничні значення температури для сухих і зволжених умов відповідно.

Фізичний зміст індексу полягає у відображенні відносного рівня вологості поверхні: зниження температури, як правило, відповідає підвищеній вологості внаслідок інтенсивного випаровування. Таким чином, аномально високі значення SMI, зафіксовані в межах Щербаківського хвостосховища або на прилеглих територіях, безпосередньо свідчать про наявність зон інфільтрації або витоків техногенних вод. Дослідження базувалося на аналізі часових рядів оптичних даних Landsat-8 за період 2013–2020 рр., що дозволило дистанційно оцінити динаміку обох секцій хвостосховища, ідентифікувати критичні зони та проаналізувати стабільність складованих матеріалів (рисунок 2).

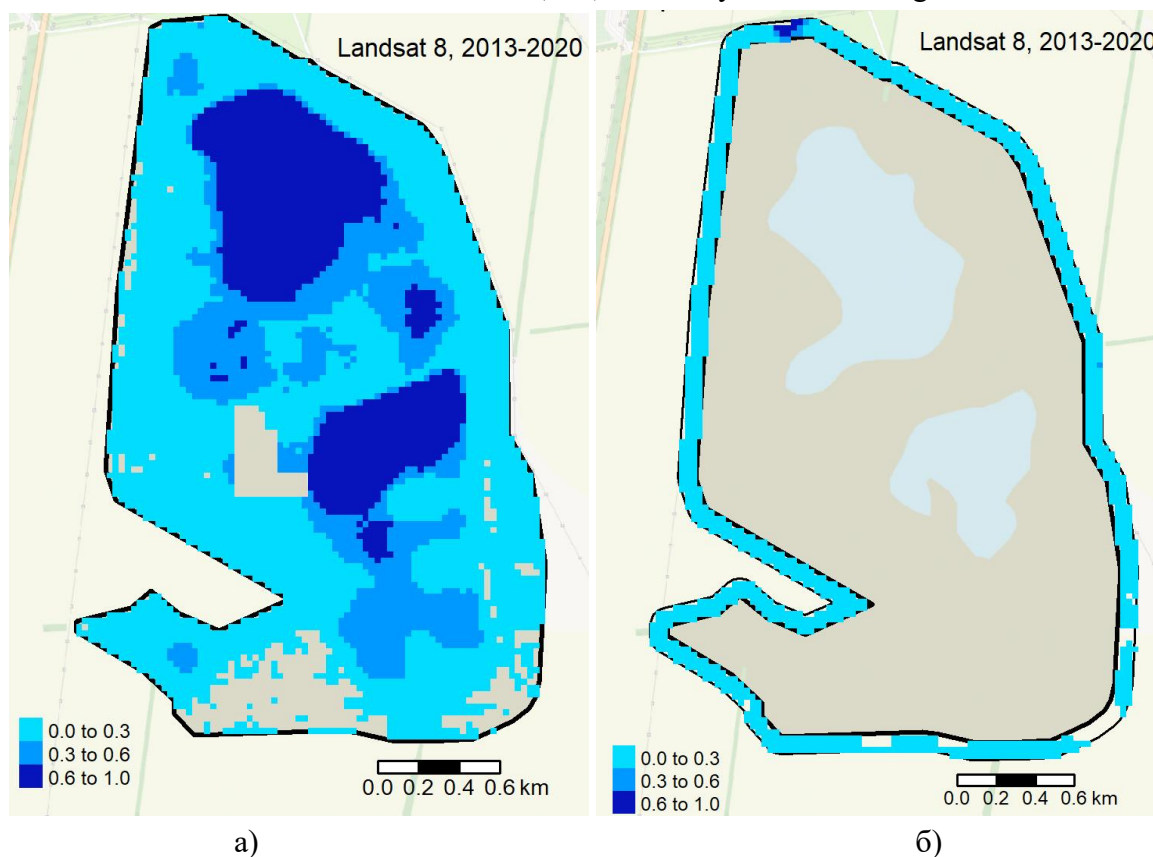


Рисунок 2 -Просторово-часова динаміка стану Щербаківського хвостосховища за даними Landsat 8 (2013-2020 рр.): а) результати аналізу динаміки індексу вологості ґрунту (SMI), що демонструють зони підвищеної вологості всередині хвостосховища; б) результати аналізу динаміки індексу вологості ґрунту (SMI), що демонструють зони підвищеної вологості в межах бортів хвостосховища

Обробка даних дозволяє зафіксувати локальні аномалії SMI за межами огорожувальних споруд, що свідчить про наявність фільтраційних витоків. Виявлені зони підвищеного зволоження просторово корелюють із напрямками міграції техногенних вод у бік сільськогосподарських територій. Оскільки рідка фаза відходів містить розчинені токсичні компоненти, їх неконтрольована міграція створює загрозу накопичення небезпечних речовин у рослинності та їх подальшого включення у трофічні ланцюги. Отже, використання температурних даних у поєднанні з аналізом часових рядів дозволяє не лише фіксувати положення аномалій, а й оцінювати їх динаміку. Це є принципово важливим для прогнозування екологічних наслідків та планування заходів з мінімізації техногенного впливу на навколишнє середовище.

Висновки. У результаті проведеного дослідження підтверджено, що сучасні методи дистанційного зондування Землі є ефективним інструментом моніторингу гірничодобувних територій та оцінювання стану об'єктів техногенного походження в умовах обмеженого наземного доступу. Встановлено, що використання мультиспектральних супутникових даних забезпечує можливість систематичного відстеження змін та своєчасного виявлення небезпечних процесів, зокрема тих, що мають прихований ха-

рактер розвитку. Доведено доцільність поєднання оптичних знімків Sentinel-2 та теплових каналів Landsat-8, що дозволяє одночасно аналізувати структуру земного покриву, динаміку рослинності та просторовий розподіл вологості [9-11]. Застосування аналізу часових рядів супутникових спостережень суттєво підвищує достовірність оцінювання, забезпечуючи виявлення техногенних трансформацій із вираженою просторово-часовою динамікою.

На прикладі Щербаківського хвостосховища встановлено, що його структурна неоднорідність зумовлює диференційований характер екологічного впливу окремих секцій. Зокрема, для старої секції більш характерними є процеси дефляції та вторинного пилового забруднення, тоді як у межах нової секції домінують фільтраційні явища та формування зон наднормативного зволоження. Виявлено, що використання супутникових індикаторів, зокрема температурних характеристик на основі розрахунку індексу вологості ґрунту (SMI), дозволяє чітко ідентифікувати зазначені процеси та локалізувати витoki техногенних вод за межі огорожувальних споруд у бік сільськогосподарських угідь.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що впровадження супутникового моніторингу формує науково-методичне підґрунтя для переходу до системного контролю стану гірничодобувних регіонів України. Це особливо актуально в умовах воєнного стану та обмеженого доступу до об'єктів підвищеної небезпеки, де традиційні методи спостережень є малоефективними. Застосування запропонованих підходів сприяє підвищенню оперативності виявлення екологічних ризиків, забезпечує обґрунтовану підтримку прийняття управлінських рішень та загалом підвищує рівень екологічної безпеки у промислово навантажених регіонах.

ЛІТЕРАТУРА

1. UNEP. *Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review and Updates for 2025–2026*; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2026. Available online: <https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine> (accessed on 7 April 2026).
2. OSCE. *Environmental Risks of the War in Ukraine: Monitoring and Assessment of Industrial Facilities on the Occupied Territories*; Organization for Security and Co-operation in Europe: Vienna, Austria, 2025. Available online: <https://www.osce.org/project-coordinator-in-ukraine/environmental-risks> (accessed on 7 April 2026).
3. Zoï Environment Network. *Environmental Risks in the Conflict Zone of Eastern Ukraine (Updated Analysis)*; Prepared for OSCE and UNEP: Geneva, Switzerland, 2025. Available online: <https://zoinet.org> (accessed on 7 April 2026).
4. Clerici, N.; Valbuena Calderón, C.A.; Posada-Posada, J.M. Fusion of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for land cover mapping in a complex heterogeneous landscape. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2017, 58, 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.007>.
5. Petropoulos, G.P.; Partiman, K.P.; Srivastava, P.K. Bridging the gap between land surface temperature and soil moisture retrieving: A review. *Theor. Appl. Climatol.* 2018, 133, 1121–1142. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2233-2>.

6. Schmidt, P.; Lauenstein, G. Monitoring of Uranium Tailings: Environmental Risks and Remote Sensing Applications. *J. Environ. Radioact.* 2021, 231, 106565. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106565>.
7. Sandholt, I.; Rasmussen, K.; Andersen, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sens. Environ.* 2002, 79, 213–224. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7).
8. Zhu, Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2017, 130, 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>.
9. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K. Open Pit Mining Activity and Stability Area Mapping in the Pyhäsalmi Mine using a Time Series of Sentinel–1 Images. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 2026, 559(1). <https://doi.org/10.1144/gslspecpub2023-216>.
10. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K.; Puputti, J.; Joutsenvaara, J.; Kotavaara, O. Optimal threshold selection for water bodies mapping from Sentinel-1 images based on Sentinel-2 water masks. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 17–22 July 2022; pp. 5551–5554. <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883600>.
11. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K.; Vasyliiev, V. Algorithm for statistical downscaling of land surface temperature using ElasticNet. *Rev. Bulg. Geol. Soc.* 2020, 81(3), 195–197.

Received 20.04.2026.

Accepted 24.04.2026.

Published 30.04.2026

Methodological approaches and information technologies for satellite monitoring of environmental risks in the mining industry

This article examines modern remote sensing technologies and their role in ensuring the environmental safety of mining regions in Ukraine. The mining industry is regarded as a strategic sector which, at the same time, places a significant anthropogenic burden on the environment due to the accumulation of waste in tailings ponds. The challenges of monitoring these sites have become significantly more acute as a result of military operations and restricted access to industrial sites, which makes traditional ground-based surveys impossible. The use of satellite platforms is a key tool for obtaining objective information on the state of the environment in hard-to-reach areas.

The aim of this study is to justify methodological approaches to the use of satellite data for the operational monitoring of mining areas and to develop a risk assessment technique based on spectral-temperature indices. The Shcherbakivske tailings pond, which contains radionuclides and toxic compounds of uranium ores, was selected as the object of study. The effectiveness of integrating satellite data for analysing the dynamics of man-made landscapes was analysed. A methodology was developed for using the Soil Moisture Index (SMI), based on a combination of thermal bands and vegetation indices. This approach allows the influence of vegetation to be mitigated and hidden zones of anthropogenic water infiltration to be identified. Based on the analysis of time series, SMI anomalies were recorded beyond the tail-

ings dam, indicating filtration leaks towards agricultural land and risks of contamination of food chains.

The introduction of satellite monitoring is essential for overcoming the fragmentation of environmental monitoring systems in Ukraine. The use of temperature data, combined with automated data processing, facilitates the transition to systematic early detection of hazardous processes.

Keywords: satellite monitoring, remote sensing, tailings ponds, mining industry, environmental risks, SMI index, radar and optical data.

Кавац Олена Олександрівна - к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0172-7856>

Kavats Olena Oleksandrivna - Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0172-7856>