



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.2.282>

УДК 528.8:502:504:550.8(477)

Супутниковий моніторинг пожежонебезпечності гірничопромислових об'єктів (на прикладі териконів Львівсько-Волинського вугільного басейну)

А. Г. Мичак*, <http://orcid.org/0000-0002-7544-7857>

В. Є. Філіпович, <https://orcid.org/0000-0002-9404-8122>

ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”,
буль. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

У статті розглянуто методико-технологічний підхід дослідження пожежонебезпечності об'єктів вуглевидобувної промисловості (зокрема, горіння/тління вугільних териконів) на основі вивчення супутникових даних у тепловому спектральному діапазоні. Дослідження проводились в моніторинговому режимі на прикладі вивчення температурного режиму териконів Червоноградського гірничопромислового району Львівсько-Волинського вугільного басейну в період 1980–2024 роки. Найбільш активний процес горіння/тління, який об'єднував майже всі терикони Червоноградського регіону, відбувався в період з 1980-х і до кінця 1990-х років. На початку 2000 років площ, ділянок горіння/тління на териконах стає менше що, очевидно, стало наслідком проведення протипожежних заходів. Спалах активності виникнення пожеж на териконах району (поява багатьох висококонтрастних температурних аномалій у межах породних відвалів), відбувся в період 2015–2017 роки. На сьогодні, за даними космічних знімачів у Червоноградському гірничопромисловому районі териконів, що горять, немає. За результатами досліджень відзначається висока ефективність використання матеріалів космічних знімачів при спостереженні та контролі виникнення, розвитку і динаміки пожежонебезпечних ситуацій на локальному та регіональному рівнях. Водночас, моніторинговий режим досліджень дає змогу прогнозувати найбільш імовірні ділянки самозаймання за відсутності явних (видимих) осередків горіння та визначати напрямок поширення тління/горіння відвальних порід. Отримані результати дають змогу цілеспрямовано вживати заходів із пожежогасіння, ефективніше використовувати стратегії управління гірничопромисловими об'єктами та мінімізувати їхній негативний вплив на довкілля.

Ключові слова: Landsat, тепловий діапазон, LST, моніторинг, вугільні терикони, пожежонебезпека, прогнозування пожеж, Червоноградський гірничопромисловий район.

© А. Г. Мичак, В. Є. Філіпович. 2025

Вступ

Дослідження пожежонебезпечності гірничопромислових об'єктів, зокрема горіння вугільних териконів, є досить актуальним завданням сьогодення. Важливим є те, що майже всі терикони (відвальні гірничопромислові відходи), незалежно від часу їх формування, схильні до самозаймання. Пожежі (тління) відвальних порід супроводжуються викидами в атмосферу широкого спектра легких хімічних сполук та елементів, серед яких основним є водна пара, в якій, крім води, можуть міститись сульфатна та карбонатна кислоти, оксиди і діоксиди вуглецю, оксиди азоту, сірки, сполуки ртуті, миш'яку, кадмію тощо, концентрації яких в десятки разів перевищують

гранично допустимі норми (Кроїк, Мельник, 2012). Дим та токсичні викиди тліючих відвальних порід, відкритих пожеж на териконах призводять до проблем, пов'язаних зі здоров'ям людей, особливо тих, хто проживає біля джерела пожежі. Отже, для запобігання виникненню пожеж і вчасного їх гасіння необхідний механізм раннього виявлення і фіксації осередків самозаймання. Таким інструментом для масштабів териконів може слугувати багатоспектральне космічне знімання з тепловим діапазоном (TIR) супутників Landsat 4, 5, 8, 9. Його застосування базується на розроблених алгоритмах і методах оброблення даних (Prata et al., 1995; Li et al., 2013; Станкевич и др., 2015; Sánchez et al., 2021; Li et al., 2022; Zheng et al., 2022; Gök et al., 2024; Albut et al., 2024 та ін.). У цих роботах

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: А. Г. Мичак: anton.mychak@gmail.com

This is an Open Access article under the CC BY licenses (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

представлено теоретичну основу для визначення LST за супутниковими даними TIR; розглянуто основні труднощі у визначенні LST за космічними вимірюваннями; проблеми валідації LST, що розраховані за супутниковими даними; описано різноманітні методи і алгоритми для оцінювання LST; висвітлено переваги, недоліки і потенціал кожного методу.

Дослідженню териконів за матеріалами супутникового знімання присвячено багато робіт як за кордоном (Wasilewski, 2020; Kumar et al., 2021; Nadudvari et al., 2021 та ін.), так і в Україні (Бусьгин, Сергеева, 2011; Сергеева, 2013; Сергеева, 2016; Філіпович та ін., 2020; Ковальчук, Крошко, 2022 та ін.) У цих роботах обґрунтовується застосування супутникової інформації для визначення осередків горіння териконів, розглядаються можливості моніторингу екологічного стану вугільних регіонів, пропонується створення геоінформаційних технологій автоматизованого аналізу зображень териконів і виявлення процесів горіння. Всі дослідження концентруються в найбільших регіонах видобування кам'яного вугілля, в Україні це переважно Донбас. Проблема горіння териконів притаманна і другому в Україні вугільному басейну – Львівсько-Волинському. Процеси перманентного горіння териконів і відвалів на його теренах дистанційними методами досліджено недостатньо, особливо в моніторинговому режимі. В умовах кліматичних змін, виснаження природних ресурсів і погіршення довкілля, впровадження сучасних дистанційних методів моніторингу та прогнозування екологічного стану цих територій є актуальним завданням.

За формою вугільні терикони поділяють на конусоподібні і плоскі (Рис. 1).



Рис. 1. Типові форми вугільних териконів, конусоподібної (А) та плоскої (Б) форм в околицях м. Донецьк. Фото з відкритих джерел. (<https://podrobnosti.ua/2481287-terikoni>; <https://www.ukrainer.net/donetsk-misto-sprotyvu>)

Конусоподібні терикони старіші, більш небезпечні, як правило, еродовані і схильні до зсувів та обвалів, більш сучасні – плоскі, за рахунок терасованості, більш безпечні і краще піддаються постмайнінговій рекультивативній. Склад вугільних териконів надзвичайно строкатий, представлений дрібнозернистими, пилоподібними рештками некондиційного вугілля, складною сумішшю різноманітних гірських порід (аргілітів, алевролітів, пісковиків, карбонатів, піритів та ін.), елементами окремих мінералів (кварц, польові шпати, мусковіт та багато інших, залежно від

геологічної будови місць видобутку), зокрема, рідкоземельних та радіоактивних металів (Рис. 2).

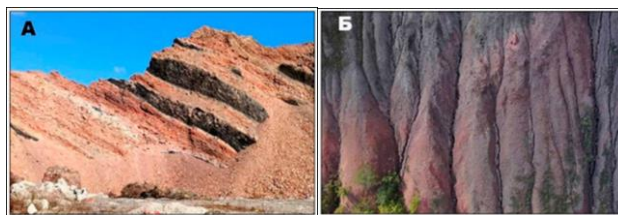


Рис. 2. Склад вугільних териконів: складна суміш різноманітних гірських порід, елементів окремих мінералів, пилоподібних решток некондиційного вугілля. Фото з відкритих джерел: А – терикон шахти Нововолинська № 8 (<https://bug.org.ua/news/novovolynsk/>, Б – один із териконів на Донбасі (<https://shotam.info/shchobyty-z-tlinniam-terykoniv-stsenarii-poriatunku-terytoriy-bilia-shakht-donbasu>)

З часом, усередині териконів, при доступі кисню та вологи з атмосфери (або за рахунок інших внутрішніх механізмів, незалежно від проникнення тепла ззовні), активно розвиваються екзотермічні реакції, процеси техногенного пірометаморфізму (Панов, Проскурня, 1999), які можуть призводити до самозаймання породних відвалів, з утворенням відкритих осередків горіння.

Терикон вважається таким, що горить, якщо на його поверхні є один осередок горіння (незалежно від його площі) з температурою порід на глибині 2,5 м більшою за +80°C (Інструкція..., 2008). Усередині багатьох териконів (які горять) весь час зберігається дуже висока температура – 500–2500°C – тому вони постійно тліють і можуть горіти (Рис. 3). Фіксація осередків горіння як на поверхні, так і під поверхнею териконів є важливим завданням попередження і ліквідації пожеж. Для розв'язання цієї проблеми пропонується застосувати супутниковий моніторинг пожежонебезпечних територій у видимому та інфрачервоному (переважно тепловому) діапазонах.



Рис. 3. Горіння терикону Центральної збагачувальної фабрики “Червоноградська” в жовтні 2016 р. Усередині весь час зберігається дуже висока температура, більше 500°C. (<https://www.unian.ua/ecology/1343910-pid-lvovom-gorit-terikon>)

Отже, головною метою досліджень є виявлення, картування і моніторинг поверхневих температурних аномалій у межах Червоноградського геолого-

промислового району Львівсько-Волинського вугільного басейну на основі аналізу матеріалів багатоспектрального космічного знімання.

Методичні підходи та вихідні матеріали

Дослідження пожежонебезпечності об'єктів вуглевидобувної промисловості (зокрема, горіння/тління вугільних териконів) проводились в моніторинговому режимі на прикладі вивчення температурного режиму шахтних териконів, відвалів гірничих порід та їхнього довкілля в межах Червоноградського гірничопромислового району Львівсько-Волинського вугільного басейну в період 1980–2024 роки. Ділянки розподілу поверхневої температури (LST) території діяльності шахт та прилеглих до них ділянок визначались на основі вивчення супутникових даних у тепловому спектральному діапазоні.

Для дослідження в архіві Геологічної служби США (USGS) були відібрані супутникові дані Landsat 4, 5, 8, 9 Collection 2 Level-2 (EROS Center, 2020 a, b) та сформована база космічних знімків з подальшим масштабуванням і перерахунком початкових даних у LST за рекомендованими USGS (Landsat., 2025) параметрами з переведенням у температурну шкалу Цельсія:

$$LST^{\circ}C = (ST * 0,00341802 + 149) - 273,15,$$

де ST – згенероване (цифрове) значення температури поверхні в тепловому каналі.

Зауважимо, щодо температури поверхні використовувались скориговані продукти Landsat 4-9 Collection 2 Level-2, які генеруються на основі теплових інфрачервоних діапазонів Landsat Collection 2 Level-1, даних відбиття верхніх шарів атмосфери (TOA), даних яскравісної температури TOA, даних глобальної бази даних випромінювання (GED) удосконаленого космічного радіометра теплового випромінювання та відбиття (ASTER), даних нормалізованого індексу різниці рослинності (NDVI) ASTER та атмосферних профілів геопотенціальної висоти, питомої вологості та температури повітря (Landsat., 2025)

Просторове розрізнення вихідного зображення було таким самим, як у вхідного, однак, для підвищення інформативності першого були застосовані (методом поєднання) супутникові дані видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів.

Для дослідження поверхневих температур відвальних порід, териконів вугільних шахт Червоноградського гірничопромислового району використовувались матеріали космічних знімків серії Landsat, починаючи з 1984 і до 2024 року, які охоплювали весняний, літній, осінній та зимовий періоди. Всього було використано 38 знімків.

Особливістю використання матеріалів дистанційних знімків є необхідність їх аналізу від найперших періодів (часу) складування гірничопромислових відходів, власне, початку формування териконів. Такі дані відіграють важливу роль у виявленні початкових аномальних

ділянок тління відвальних порід, відстежування динаміки їх розвитку в часі та масштабів прояву.

Результати та обговорення

У межах Червоноградського вугільного району побудовано 12 шахт (Рис. 4), в результаті діяльності яких утворено 24 породних відвали.

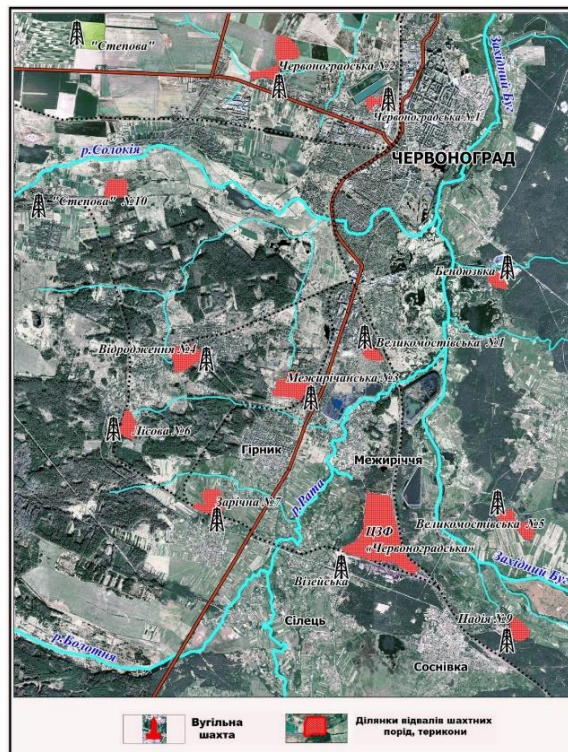


Рис. 4. Оглядова схема вугільних шахт та териконів Червоноградського гірничодобувного району Львівсько-Волинського вугільного басейну (2020 р.)

На початку 2020 років площа відвальних порід становила 187,03 га, в яких накопичено 35,33 млн м³ промислових відходів усіх класів небезпеки. Найбільші території займають відходи на шахтах “Межирічанській” (28,57 га), “Відродження” (24,39 га), Великомоствівській № 5 (23,04 га) та “Червоноградській” (17,93 га). Площа інших відвалів знаходиться в межах від 0,08–0,1 до 0,29–0,35 кв. км (Побережський та ін, 2019; Іванов, Ковальчук, 2024).

На сьогодні (2023–2024 рр.) із 12 шахт району діючих залишилося шість (Екологічний паспорт..., 2024): “Великомостівська”, “Межирічанська”, “Відродження”, “Лісова”, “Степова”, “Червоноградська”. Основна частина запасів вугілля знаходиться на полях шахт “Степова” (62,5%), “Лісова” (16,2%) та “Великомостівська” (10,5%).

Аналіз розподілу поверхневої температури (LST) за даними дистанційних знімків Червоноградського району 1984 – 1989 – 1990 – 1999 – 2000 – 2017 – 2024 роках свідчить про те, що процеси горіння, тління териконів у регіоні були постійними, а їх інтенсивність на окремих шахтах була різною. З початку 2000 років

аномально підвищений (високий) температурний режим териконів почав знижуватись і на сьогодні (2025 р.) контрастних теплових аномалій на шахтах Червоноградського вуглепромислового району не зафіксовано. Разом з тим, зауважимо, що період 2015–2017 роки, на загальному фоні зниження пожежонебезпечності, відзначився спалахом високих значень температурного поля породних відвалів на багатьох шахтах. Особливо активно горіли/тліли відвальні породи Центральної збагачувальної фабрики (Рис. 5, 6).



Рис. 5. Горить/тліє терикон, який насипає ПАТ “Львівська вугільна компанія”. Причина самозаймання – порушення технологій вивезення і трембування породи (вересень 2015 р. (Дудар, 2016))



Рис. 6. Гасіння чергового самозаймання на териконі Червоноградської збагачувальної фабрики. Вересень 2016 р. Фото: Львівський портал, 2016

Найбільш інтенсивно горіли терикони вуглепромислового району у 1984–1989 та 1990-х роках (Рис. 7, 8). 3 вересня 1984 року на 10–11 годину ранку, при середній температурі поверхні території Червоноградського регіону $+24,8^{\circ}\text{C}$, температурні показники породних відвалів на шахтах становили: “Лісова 6” – від $+31,6$ до $+33,3^{\circ}\text{C}$, “Відродження 4” – від $+31,5$ до $+35,2^{\circ}\text{C}$, “Великомостівська 1” – від $+33,1$ до $+34,6^{\circ}\text{C}$, Центральна збагачувальна фабрика (ЦЗФ) “Червоноградська” – від $+31,6$ до $+33,8^{\circ}\text{C}$. Різниця між тепловими “островами” над відвалами гірничих порід шахт і фоном становила $8\text{--}10^{\circ}\text{C}$.

1 березня 1986 року (Рис. 7) о 10–11 годині ранку, при середній температурі поверхні території Червоноградського регіону $-11,0^{\circ}\text{C}$, температурні показники породних відвалів на шахтах становили: “Лісова 6” – від $-7,1$ до $-2,7^{\circ}\text{C}$, “Відродження 4” – від

$+2,1$ до $-4,1^{\circ}\text{C}$, “Великомостівська 1” – температура в одній точці (одному пікселі) на поверхні сягала $+3,5^{\circ}\text{C}$, а поруч, по площі, навколо – від $-2,4$ до $-5,2^{\circ}\text{C}$. Різниця між тепловими “островами” над відвалами гірничих порід шахт і фоном була $4\text{--}14^{\circ}\text{C}$.

3 вересня 1988 року (Рис. 7) о 10–11 годині ранку, при середній температурі поверхні території Червоноградського регіону $+21,6^{\circ}\text{C}$, температурні показники породних відвалів на шахтах становили: “Лісова 6” – від $+23,8$ до $+30,98^{\circ}\text{C}$, “Відродження 4” – від $+25,5$ до $+28,9^{\circ}\text{C}$, “Зарічна 7” – від $+26,5$ до $28,9^{\circ}\text{C}$, “Межирічанська 3” – від $+26,0$ до $+28,19^{\circ}\text{C}$, ЦЗФ “Червоноградська” – від $+26,0$ до $+30,56^{\circ}\text{C}$.

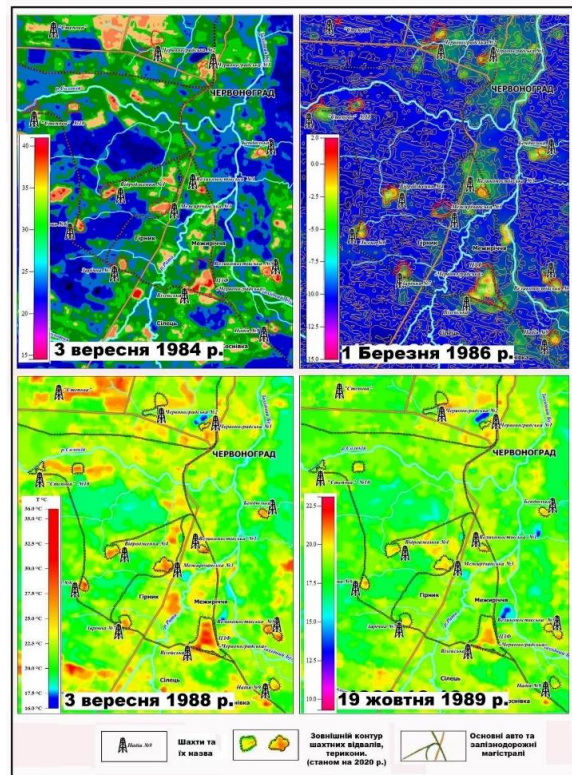


Рис. 7. Розподіл температури денної поверхні (LST) Червоноградського гірничопромислового району 03.09.1984 р., 01.03.1986 р., 30.09.1988 р., 19.10.1989 р., на 9 год 30–40 хв, отримано супутником Landsat 5, розраховано за даними теплового каналу В6 у спектральному діапазоні $10,40\text{--}12,5$ мкм. Значення температури LST на шкалі зліва наведено в $^{\circ}\text{C}$

Різниця між тепловими “островами” над відвалами гірничих порід шахт і фоном становила $4\text{--}9^{\circ}\text{C}$.

21 квітня 1993 року (Рис. 8) о 10–11 годині ранку, при середній температурі поверхні території Червоноградського регіону $+15,38^{\circ}\text{C}$, температурні показники породних відвалів на шахтах становили: “Червоноградська 2” – від $+21,7$ до $+26,7^{\circ}\text{C}$, “Лісова 6” – від $+19,8$ до $+24,9^{\circ}\text{C}$, “Відродження 4” – від $+21,4$ до $+25,7^{\circ}\text{C}$, “Межирічанська 3” – від $+21,3$ до $+22,9^{\circ}\text{C}$, ЦЗФ “Червоноградська 1” – від $+21,0$ до $+27,0^{\circ}\text{C}$.

Різниця між тепловими “островами” над відвалами гірничих порід шахт і фоном була $4\text{--}9^{\circ}\text{C}$.

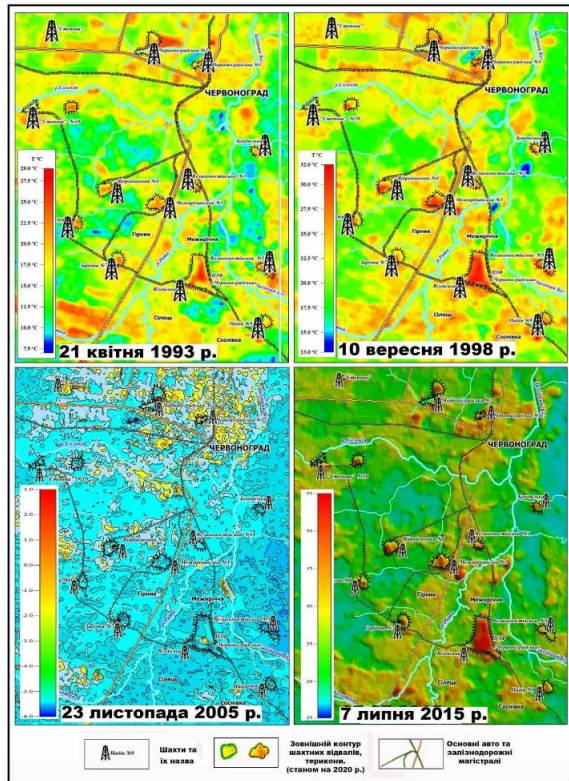


Рис. 8. Розподіл температури денної поверхні (LST) Червоноградського гірничопромислового району 21.04.1993 р., 10.09.1998 р., 23.11.2005 р., 07.07.2015 р., на 9 год 30–40 хв, отримано супутником Landsat 5, розраховано за даними теплового каналу В6 у спектральному діапазоні 10.40–12.5 мкм. Значення температури LST наведено в °С

10 вересня 1998 року (Рис. 8) о 10–11 годині ранку, при середній температурі поверхні території Червоноградського регіону +21,4°С, температурні показники породних відвалів на шахтах становили: “Зарічна 7” – від +26,5 до +30,1°С, “Лісова 6” – від +26,6 до +28,4°С, “Відродження 4” – від +26,6 до +30,9°С, “Степова 10” – від 26,4 до 29,5°С, “Червоноградська 1” – від 27,3 до 30,6°С, “Межирічанська 3” – від +27,7 до +30,5°С, ЦЗФ “Червоноградська” – від +27,7 до +32,0°С. Різниця між тепловими “островами” над відвалами гірничих порід шахт і фоном була 5–15°С.

Узагальненою, типовою картиною теплового забруднення поверхні Червоноградського вуглепромислового району періоду 1984–1990 роки в результаті горіння/тління шахтних гірських порід (териконів) може слугувати розподіл поверхневої температури (LST) наведений на Рис. 9 за матеріалами знімання Landsat 5 від 28.03.1996 р.

З 2000-х років, як ми уже відзначали, пожеж на териконах стало дещо менше. Очевидно, це стало наслідком того, що на породних відвалах окремих шахт стали активніше вживати протипожежних заходів шляхом перешаровування вуглевмісних порід нейтральними, негорючими (глиною, піском). На деяких териконах активніше проводилась роботи з їх

рекультиватії. Давні відвальні породи використовувались як будівельний матеріал. Крім того, частина шахт була ліквідована, деякі періодично не працювали. Разом з тим, у 2015–2017 роках на ряді шахт відбулося різке підвищення температурного режиму.

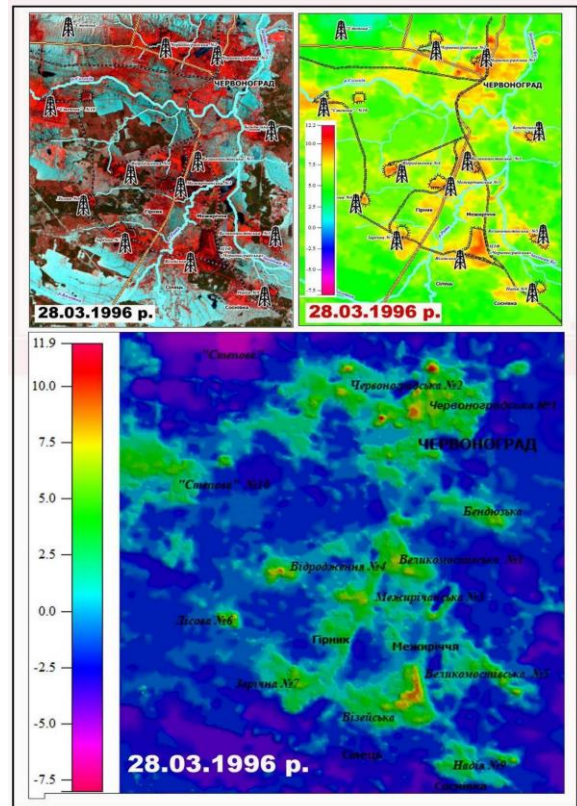


Рис. 9. Розподіл поверхневої температури (теплове забруднення, теплові “острови”) поверхні Червоноградського вуглепромислового району в результаті горіння/тління шахтних породних відвалів (териконів) за матеріалами знімання Landsat 5 (знімання 28.03.1996 р. о 10 год 38 хв)

23 листопада 2005 року (Рис. 10) о 10–11 годині ранку, при середній температурі поверхні території Червоноградського регіону +1,6°С, температурні показники породних відвалів на шахтах становили: “Зарічна 7” – від 0,0 до +1,1°С, “Лісова 6” – від +0,2 до +0,7°С, “Відродження 4” – від +0,7 до +3,3°С, “Червоноградська 1” – від +0,7 до +2,8°С, ЦЗФ “Червоноградська” – від +0,4 до +2,7°С.

Різниця між тепловими “островами” над відвалами гірничих порід шахт і фоном була 0–2,5°С.

11 вересня 2015 року о 10–11 годині ранку, при середній температурі поверхні території Червоноградського регіону +32,0°С, температурні показники породних відвалів становили на шахтах: “Зарічна 7” – від +38,6 до +40,1°С, “Лісова 6” – від +36,5 до +41,4°С, “Відродження 4” – від +37,6 до +42,5°С, “Степова 1” – від +37,5 до +40,2°С, “Межирічанська 3” – від +38,0 до +41,48°С, “Надія 9” – від +36,8 до +40,17°С, ЦЗФ “Червоноградська” – від +41,5 до +49,7°С.

Різниця між тепловими “островами” над відвалами гірничих порід шахт і фоном була 4–17°C.

27 грудня 2020 року (Рис. 10) о 10–11 годині ранку, при середній температурі поверхні території Червоноградського регіону –1,2°C, температурні показники породних відвалів на шахтах становили: “Зарічна 7” – від –0,1 до +0,1°C, “Лісова 6” – від –0,1 до +1,8°C, “Відродження 4” – від –0,2 до +0,4°C, “Межирічанська 3” – від –0,3 до +0,25°C, ЦЗФ “Червоноградська” – від +0,6 до +3,1°C.

Різниця між тепловими “островами” над відвалами гірничих порід шахт і фоном була 1–4°C.

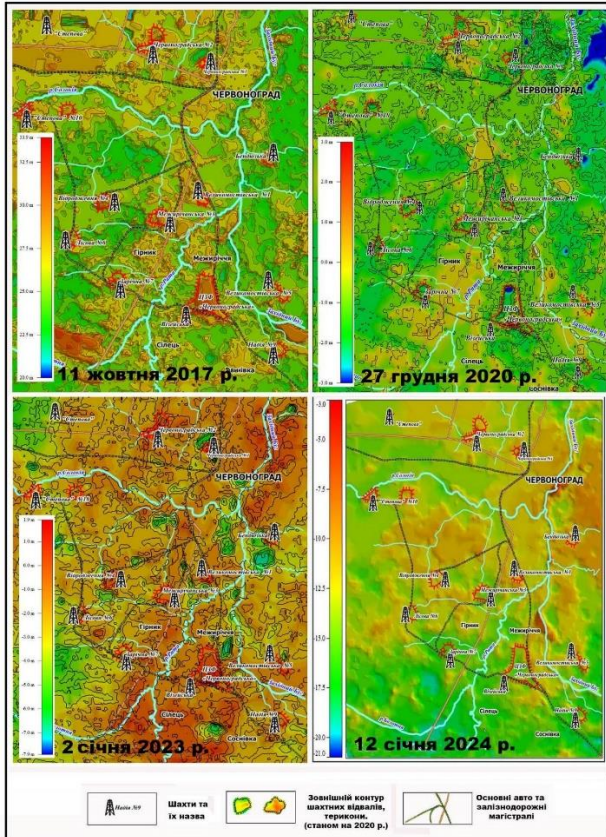


Рис. 10. Розподіл температури денної поверхні (LST) Червоноградського гірничопромислового району 11.10.2017 р., 27.12.2010 р., 01.01.2023 р., 12.01.2024 р. на 9 год 30–40 хв, отримано супутником Landsat 5, розраховано за даними теплового каналу В6 у спектральному діапазоні 10.40–12.5 мкм. Значення температури LST наведено в °C

12 січня 2024 року (Рис. 10) о 10–11 годині ранку, при середній температурі поверхні території Червоноградського регіону –13,7°C, температурні показники породних відвалів становили на шахтах: “Зарічна 7” – від –10,7 до –9,4°C, “Лісова 6” – від –11,5 до –10,6°C, “Відродження 4” – від –10,0 до –8,3°C, “Межирічанська 3” – від –10,6 до –9,3°C, ЦЗФ “Червоноградська” – від –10,0 до –6,2°C.

Різниця між тепловими “островами” над відвалами гірничих порід шахт і фоном була 4–7°C.

Супутникові моніторингові дослідження теплового поля териконів Червоноградського вуглепромислового району свідчать, що найбільш стійким у часі та за об’ємом теплового забруднення атмосфери в регіоні є породні відвали ЦЗФ “Червоноградська”. Свою роботу фабрика розпочала в 1970 році. Відтоді вона переробила мільйони тонн “чорного золота” з Львівсько-Волинського вугільного басейну, роблячи його більш енергомістким. Більш як за 50 років біля фабрики накопичено гірничих післяфлотацийних відходів площею близько 70 гектарів і висотою до 120 метрів, які стали постійно / періодично всетліючим териконом від початку роботи фабрики та майже до 2023 року.

Починаючи з 1984 року, з часу отримання перших космічних знімків серії Landsat в тепловому діапазоні, терикон ЦЗФ “Червоноградська” є постійним в часі аномальним об’єктом, що мав різну конфігурацію температурних проявів (Рис. 11).

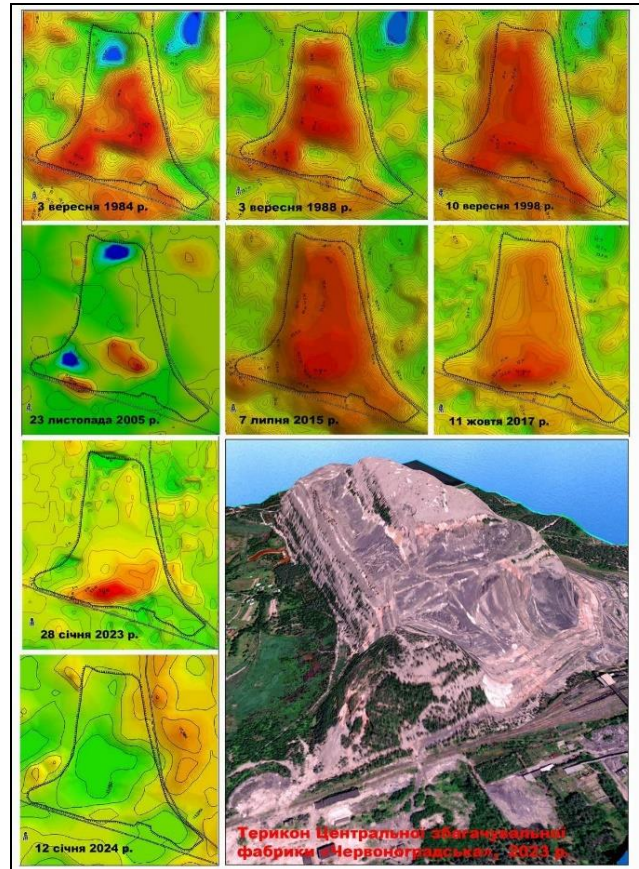


Рис. 11. Розподіл температури денної поверхні терикону ЦЗФ “Червоноградська” 3.09.1984 р., 3.09.1988 р., 10.09.1998 р., 23.11.2005 р., 7.07.2015 р., 11.02.2017 р., 28.01.2023 р., 12.01.2024 р. за даними знімків супутників Landsat 5, 8, 9 (спектральний діапазон 10.40–12.5 мкм)

Значення ізоліній температури наведено в °C, шкала температур на кожному фрагменті є відносною від мінімальних до максимальних значень. 3D-модель терикону наведена на 2023 р. на основі SRTM Worldwide Elevation.

Висновки

Отже, найбільш активний процес горіння/тління, який об'єднував майже всі терикони Червоноградського регіону, відбувався в період з 1980-х і до кінця 1990-х років, – про що свідчить наявність значної кількості температурних аномалій (контрастних по відношенню до фону) в місцях складування гірничих породних відвалів біля шахт: “Зарічна 7”, “Лісова 6”, “Відродження 4”, “Степова 10”, “Червоноградська 1”, “Межирічанська 3”.

З 2000-х років площ, ділянок горіння/тління на териконах стає менше, що, очевидно, стало наслідком проведення протипожежних заходів. Спалах активності виникнення пожеж на териконах району (поява цілої низки висококонтрастних температурних аномалій у межах породних відвалів), відбувся в період 2015–2017 роки. На сьогодні, за даними космічних знімачь у Червоноградському гірничопромисловому районі териконів, що горять, немає.

За результатами досліджень можна відзначити високу ефективність використання матеріалів космічних знімачь при спостереженні та контролі виникнення, розвитку і динаміки пожежонебезпечних ситуацій на локальному та регіональному рівнях (Табл. 1).

Таблиця 1. Використання дистанційних даних для моніторингових досліджень пожеж на вугільних териконах

Напрями використання	Результати використання	Вид дистанційних даних
Дослідження температурного поля териконів	Виявлення активних пожеж на вугільних териконах, ділянок тління породних відвалів, ділянок з аномально високими значеннями температури, що дає змогу оперативно отримувати інформацію про температурний стан поверхні будь-якого відвалу	Landsat БпЛА
Моніторинг температурного поля (вивчення масштабів прояву, динаміки розвитку, інтенсивності)	Відслідковування в часі (зокрема реальному) динаміки поширення пожежі (пожеж), осередків тління, оцінювання їх розміру та інтенсивності, їх потенційного впливу на природне середовище, селітебну забудову, інфраструктурні об'єкти	Landsat БпЛА
Оцінювання впливу на довкілля (діючих і недіючих териконів, породних відвалів, що горять)	Оцінювання масштабів забруднення довкілля внаслідок пожеж на вугільних териконах, діючих і недіючих териконах, їх впливу на селітебні території, водні ресурси, рослинний та ґрунтовий покрив, сільськогосподарські угіддя	Landsat Sentinel SRTM БпЛА
Прогнозування ризику пожежонебезпечності	На основі результатів супутникового моніторингу розробка моделей прогнозування пожежонебезпечності на вугільних териконах. Розробка заходів з попередження пожеж та покращення стратегії управління ризиками пожежонебезпечності	Landsat БпЛА
Управління відновленням	Оцінювання пошкоджень териконів, розроблення моделей рекультиваци териконів, контроль та моніторинг процесів рекультиваци	Sentinel БпЛА

Моніторинговий режим досліджень дає змогу прогнозувати найбільш імовірні ділянки самозаймання за відсутності явних (видимих) осередків горіння та визначати напрямок поширення тління/горіння відвальних порід. Таким чином, супутниковий моніторинг пожежної небезпеки гірничопромислових об'єктів є важливим та ефективним інструментом з прогнозування, виявлення та оцінювання пожежонебезпечних ситуацій у місцях видобутку корисних копалин, зокрема, територій вуглевидобування.

Дистанційний супутниковий моніторинг гірничопромислових об'єктів включає оперативність, високу точність і можливість одночасного спостереження та контролю великих територій ризику виникнення і розвитку пожежонебезпечних ситуацій. Особливістю моніторингових досліджень пожежної небезпеки місць видобутку корисних копалин є охоплення максимально широкого часового періоду дистанційного спостереження за об'єктами дослідження в тепловому діапазоні, що дає змогу прогнозувати розвиток пожежонебезпечних процесів на териконах і відвалах.

Застосування запропонованих методико-технологічних підходів до аналізу дистанційних матеріалів багатоспектральних знімачь дає змогу завчасно отримувати дані про умови, що сприяють виникненню та поширенню пожеж, а також оперативно відстежувати зміни на територіях, схильних до таких ризиків.

Отримані результати дають змогу цілеспрямовано вживати заходи з пожежогасіння, ефективніше використовувати стратегії управління гірничопромисловими об'єктами та мінімізувати їх негативний вплив на довкілля.

Author Contributions: Conceptualization – A. G. Mychak; methodology and analysis – V. Ye. Filipovych, A. G. Mychak; systematization, visualization – A. G. Mychak, V. Ye. Filipovych; preparation of the text of the article: the author's manuscript – A. G. Mychak; reviewing and editing – V. Ye. Filipovych. All authors read and agreed with the published version of the manuscript.

Funding: This study has not received external funding.

Data Availability Statement: Not applied.

Acknowledgments: The authors are grateful to the reviewers and editors for their valuable comments, recommendations and attention to work.

Conflicts of Interest: Authors declare no conflict of interest.

Внесок авторів:

Концептуалізація – А. Г. Мичак; методологія та аналіз – В. Є. Філіпович, А. Г. Мичак, систематизація, візуалізація – А. Г. Мичак, В. Є. Філіпович; підготовка тексту статті: авторський рукопис – А. Г. Мичак, рецензування та редагування – В. Є. Філіпович; Всі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Фінансування: Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Доступність даних: Не застосовується.

Подяки: Автори вдячні рецензентам і редакторам за їхні цінні коментарі, рекомендації та увагу до роботи.

Конфлікти інтересів: Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів

Література

- Albut, S. (2024) Land Surface Temperature (LST) Calculation processes with Landsat 8. In book: *Pioneer and innovative studies in engineering*. Chapter 9. Publisher: All Sciences Academy 133–148. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/387690673_Land_Surface_Temperature_LST_Calculation_processes_with_Landsat_8#fullTextFileContent.
- Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020a). Landsat 8–9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey, doi: 10.5066/P9OGBGM6.
- Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020b). Landsat 4–5 Thematic Mapper Level-2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey, doi: 10.5066/P9IAXOVV.
- Gök, D., Scherler, D., Wulf, H. (2024) Land surface temperature trends derived from Landsat imagery in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 18(11), 5259–5276, doi: 10.5194/tc-18-5259-2024.
- Kumar, A., Ratnam, R., Krishna, A. P. (2021). Detection of Coal Mine Fire Using Landsat-8 OLI/TIRS Satellite Data in Ramgarh and Hazaribagh Coalfields, India. In: Rai, P. K., Singh, P., Mishra, V. N. (eds) Recent Technologies for Disaster Management and Risk Reduction. *Earth and Environmental Sciences Library*, 451–464. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-76116-5_23.
- Landsat Collection 2 Surface Temperature (2025). USGS Landsat Missions. Retrieved from <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature>.
- Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F., Sobrino, J. A. (2013). Satellite derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131(12), 14–37. doi: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
- Nadudvari, A., Abramowitz, A., Fabianska, M., Misz-Kennan, M., Ciesielczuk, J. (2021). Classification of fires in coal waste dumps based on Landsat, Aster thermal bands and thermal camera in Polish and Ukrainian mining regions. *International Journal of Coal Science & Technology*, 8, 441–456. doi: 10.1007/s40789-020-00375-4.
- Prata, A. J., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J. A., & Otlé, C. (1995). Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 12(3–4), 175–224.
- Sánchez, J. M., Coll, C., Niclòs, R. (2021). Editorial for the Special Issue “Remote Sensing Monitoring of Land Surface Temperature”. *Remote Sensing*, 13(9), 1765. doi: 10.3390/rs13091765.
- Wasilewski, S. (2020). Monitoring the thermal and gaseous activity of coal waste dumps. *Environmental Earth Sciences*, 79(20), 474. doi: 10.1007/s12665-020-09229-3.
- Zhao-Liang Li, Hua Wu, Si-Bo Duan, Wei Zhao, Huazhong Ren, Xiangyang Liu ... Chenghu Zhou (2022). Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. *Reviews of Geophysics*, 61(1), 77. doi: 10.1029/2022RG000777.
- Бусыгин, Б. С., Сергеева, Е. Л. (2011). Мониторинг состояния терриконов Донбасса по данным мультиспектральных космических съемок. *Научный вестник НГУ*, 2, 39–44. Взято з <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/zavipuskami/330-2011/zmist-2-2011>.

- Екологічний паспорт Львівської області за даними 2023 року*. (2024), Львів: Департамент екології та природних ресурсів Львівської обласної державної адміністрації Взято з https://drive.google.com/file/d/1hPAiUwWFhuMd_IUqQ9E-kvK_J1VlPqLg/view?pli=1.
- Іванов, Є. А., Ковальчук, І. П. (2024). Накопичення гірничопромислових відходів у Львівсько-Волинському кам'яновугільному басейні: сучасний стан, проблеми і перспективи поводження. *Український журнал природничих наук*, 7, 75–84. doi: 10.32782/naturaljournal.7.2024.8.
- Інструкція із запобігання самозапалюванню, гасіння та розбирання породних відвалів. НПАОП 10.0-5.21-04. (2008). Харків: Індустрія.
- Ковальчук, М., Крошко, Ю. (2022). Паспортизація породних відвалів вуглевидобувних територій – основа створення їх ГІС-системи та оцінки впливу на довкілля. *Гірнична геологія та геоecологія*, 1(2), 35–51. doi: 10.59911/mgg.2786-7994.2021.1(2).251868.
- Кроїк, Г. А., Мельник, О. В. (2012). Закономірності розподілу техногенних та токсичних елементів у відходах добування та переробки вугілля Західного Донбасу. *Вісник ДНУ. Серія Геологія. Географія*, 20(3/2), 77–82. doi: 10.15421/111219.
- Панов, Б. С., Проскурня, Ю. А. (1999). О техногенной минерализации породных отвалов угольных шахт Донбасса. *Геология угольных месторождений* (с. 241–249). Екатеринбург.
- Побережський, А., Бучинська, І., Шевчук, О., Муқан, Т. (2019). Гірничовидобувний комплекс Львівсько-Волинського вугільного басейну та його вплив на екосистему регіону. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 3(180), 52–59. doi: 10.15407/ggem2019.03.052.
- Сергеева, Е. Л. (2013). Автоматизированный анализ состояния терриконов по данным дистанционного зондирования Земли на основе ГИС-технологии. *Збірник наукових праць НГУ*, 41, 103–112. Взято з <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2013/41.pdf>.
- Сергеева, Е. Л. (2016) Геоінформаційний аналіз місцевості з терриконами за даними космічної зйомки. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 5, 18–23. Взято з <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1963/1964>.
- Станкевич, С. А., Филиппович, В. Е., Лубский, Н. С., Крылова, А. Б., Крицук, С. Г., Бровкина, О. В., Горный, В. И., Тронин, А. А. (2015). Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 7, 12–21. Взято з <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59>.
- Філіпович, В. Є., Мичак, А. Г., Шевчук, Р. М. (2020, жовтень). Можливості використання супутникових даних для моніторингу пожежонебезпечності терриконів Львівсько-Волинського вугільного басейну (с. 81–84). *Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології*. Взято з <https://tinyurl.com/bdhkwa3>.

Reference

- Albut, S. (2024) Land Surface Temperature (LST) Calculation processes with Landsat 8. In book: *Pioneer and innovative studies in engineering*. Chapter 9. Publisher: All Sciences Academy 133–148. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/387690673_Land_Surface_Temperature_LST_Calculation_processes_with_Landsat_8#fullTextFileContent.

- urface_Temperature_LST_Calculation_processes_with_Land_sat_8#fullTextFileContent.
- Busygin, B. S., Sergeeva, E. L. (2011). Monitoring of a condition of Donbass heaps according to data of multispectral space surveys. *Scientific herald of NGU*, 2, 39–44. (in Russian). Retrieved from <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/330-2011/zmist-2-2011>.
- Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020a). Landsat 8–9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey, doi: 10.5066/P9OGBGM6.
- Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020b). Landsat 4–5 Thematic Mapper Level-2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey, doi: 10.5066/P9IAXOVV.
- Ecological passport of Lviv region based on 2023 data*. (2024), Lviv: Department of Ecology and Natural Resources of Lviv Regional State Administration. Retrieved from https://drive.google.com/file/d/1hPAiUwWFhuMd_IUqQ9E-kvK_J1VIpqLg/view?pli=1.
- Filipovych, V. E., Mychak, A. G., Shevchuk, R. M. (2020, October). Possibilities of using satellite data to monitor the fire hazard of waste heaps in the L'viv-Volynskii coal basin (p. 81–84). *Waste Management in Ukraine: Legislation, Economics, Technology*. Retrieved from <https://tinyurl.com/bdhkwza3>.
- Gök, D., Scherler, D., Wulf, H. (2024) Land surface temperature trends derived from Landsat imagery in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 18(11), 5259–5276, doi: 10.5194/tc-18-5259-2024.
- Ivanov, Ye. A., Kovalchuk, I. P. (2024). Accumulation of mining wastes in the Lviv-Volyn coal basin: current conditions, problems and perspectives of management. Ivan Franko Zhytomyr State University. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 7, 75–84. doi: 10.32782/naturaljournal.7.2024.8.
- Instruction on prevention of spontaneous combustion, extinguishing and dismantling of waste heaps. RLALP 10.0-5.21-04. (2008). Kharkiv: Industry.
- Kovalchuk, M. S., Kroshko, Yu. V. (2022). Certification of waste heaps of coal mining areas –the basis for the creation of their GIS-system and environmental impact assessment. *Mining geology and Geoecology*, 1(2), 35–51. doi: 10.59911/mgg.2786-7994.2021.1(2).251868.
- Kroik, G. A., Melnyk, O. V. (2012). Patterns of distribution of man-made and toxic elements in coal mining and processing wastes of the Western Donbass. *DNU Bulletin. Series Geology. Geography*, 14(3/2), 77–82. doi: 10.15421/111219.
- Kumar, A., Ratnam, R., Krishna, A. P. (2021). Detection of Coal Mine Fire Using Landsat-8 OLI/TIRS Satellite Data in Ramgarh and Hazaribagh Coalfields, India. In: Rai, P. K., Singh, P., Mishra, V. N. (eds) *Recent Technologies for Disaster Management and Risk Reduction. Earth and Environmental Sciences Library*, 451–464. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-76116-5_23.
- Landsat Collection 2 Surface Temperature (2025). USGS. Landsat Missions. Retrieved from <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature>.
- Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F., Sobrino, J. A. (2013). Satellite derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131(12), 14–37. doi: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
- Nadudvari, A., Abramowitz, A., Fabianska, M., Misz-Kennan, M., Ciesielczuk, J. (2021). Classification of fires in coal waste dumps based on Landsat, Aster thermal bands and thermal camera in Polish and Ukrainian mining regions. *International Journal of Coal Science & Technology*, 8, 441–456. doi: 10.1007/s40789-020-00375-4.
- Panov, B. S., Proskurnya, Y. A. (1999). On technogenic mineralization of rock dumps of Donbass coal mines. *Geology of coal deposits* (p. 241–249). Ekaterinburg.
- Prata, A. J., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J. A., & Otlé, C. (1995). Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 12(3–4), 175–224.
- Poberezhsky, A., Buchynska, I., Shevchuk, O., Mukan, T. (2019). Mining complex of the Lviv-Volyn coal basin and its impact on the ecosystem of the region. *Geology & Geochemistry of Combustible Minerals*, 3(180), 52–59. doi: 10.15407/ggcm2019.03.052.
- Sánchez, J. M., Coll, C., Niclòs, R. (2021). Editorial for the Special Issue “Remote Sensing Monitoring of Land Surface Temperature”. *Remote Sensing*, 13(9), 1765. doi: 10.3390/rs13091765.
- Sergeeva, E. L. (2013). Automated analysis of the state of spoil heaps using remote sensing data based on GIS technology. *Collection of research scientific works of the National Mining University*, 41, 103–112. Retrieved from <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2013/41.pdf>.
- Sergieieva, E. L. (2016) Geoinformation Analysis of Areas with Slagheaps Using Satellite Imagery. *Bulletin of Vymytsia Polytechnic Institute*, 5, 18–23. Retrieved from <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1963/1964>.
- Stankevich, S. A., Filipovich, V. E., Lubskey, N. S., Krylova, A. B., Kritsuk, S. G., Brovkina, O. V., Gornyy, V. I., Tronin A. A. Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal-infrared satellite imaging *Ukrainian journal of remote sensing*, 7, 12–21. Retrieved from <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59>.
- Wasilewski, S. (2020). Monitoring the thermal and gaseous activity of coal waste dumps. *Environmental Earth Sciences*, 79(20), 474. doi: 10.1007/s12665-020-09229-3.
- Zhao-Liang Li, Hua Wu, Si-Bo Duan, Wei Zhao, Huazhong Ren, Xiangyang Liu ... Chenghu Zhou (2022). Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. *Reviews of Geophysics*, 61(1), 77. doi: 10.1029/2022RG000777.

SATELLITE MONITORING OF FIRE HAZARD OF MINING FACILITIES (on the example of waste heaps in the L'viv-Volynskii coal basin)

A. G. Mychak (<http://orcid.org/0000-0002-7544-7857>), V. Ye. Filipovych (<https://orcid.org/0000-0002-9404-8122>)

State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine”, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine.

The article considers the methodological and technological approach to studying the fire hazard of coal mining facilities (in particular, burning/smoldering of coal spoil heaps) based on the study of satellite data in the thermal spectral range. The research was carried out in a monitoring mode on the example of studying the temperature regime of the waste heaps of the Chervonohrad mining district of the L'viv-Volynskii coal basin in the period 1980–2024. The most active burning / smoldering process, which united almost all the waste heaps of

the Chervonohrad region, occurred in the period from the 1980s to the end of the 1990s. Since the beginning of the 2000s, the areas of burning/smoldering spoil heaps have become smaller, which is obviously a consequence of the implementation of fire protection measures. An outbreak of fire activity on the waste heaps in the district (the appearance of a number of highly contrasting temperature anomalies within the waste heaps) occurred in 2015-2017. Today, according to satellite imagery, there are no burning waste heaps in the Chervonohrad mining district. According to the research results, the high efficiency of using space imagery materials in monitoring and controlling the occurrence, development and dynamics of fire hazardous situations at the local and regional levels is noted. At the same time, the monitoring mode of research makes it possible to predict the most likely areas of spontaneous combustion in the absence of obvious (visible) burning centers and determine the direction of smoldering/burning of waste rock. The results obtained make it possible to target fire-fighting activities, more efficient strategies for the management of mining facilities to apply and to minimize their negative impact on the environment.

Keywords: Landsat, thermal band, LST, monitoring, coal spoil heaps, fire hazard, fire forecasting, Chervonohrad mining district.

Рукопис статті отримано 07.05.2025

Надходження остаточної версії: 15.05.2025

Публікація статті: 30.06.2025