



16. Mahaboob, B., Ajmath, K. A., Venkateswarlu, B., Narayana, C., & Praveen, J. P. (2019, December). On Cobb-Douglas production function model. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2177, No. 1, p. 020040). AIP Publishing LLC.
17. Khorolskyi, A., Mamaikin, O., Lisovytska, I., Sheka, I., & Delehan, S. Investigation of Coal Reserve Recovery Indicators in Low-Capacity Mines Considering the Reprocessing of Mining Waste. In *1st DIM-ESEE 2025 conference: Development and Innovations in Mineral Resourcing*, MR47-MR53.
18. Хорольський, А. О., Зеленакова, М., Круковський, О. П., Мамайкін, О. Р., & Делеган, С. В. (2025). Strategic selection of coal mining enterprises' industrial stock finalization based on the analytic hierarchy process (AHP method). *Мінеральні ресурси України*, (4), 59-64.
19. Syakur, M. A., Khotimah, B. K., Rochman, E. M. S., & Satoto, B. D. (2018, April). Integration k-means clustering method and elbow method for identification of the best customer profile cluster. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 336, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
20. Хорольський, А.О. (2026). Застосування мереж Петрі для оцінки коефіцієнту готовності технологічних схем вугільних шахт. *Потураївські читання 2026*, 52-54.

УДК 622.271:504.064:528.8:004.94

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНІ МУЛЬТИСЕНСОРНІ БПЛА-СИСТЕМИ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ВІДХОДІВ ВУГЛЕВИДОБУТКУ

І.І. Чоботько¹

¹старший викладач кафедри спеціальної фізичної підготовки, e-mail: efilonov79@gmail.com

¹Дніпровський державний університет внутрішніх справ, Дніпро, Україна

Анотація. У роботі розглянуто проблему утворення значних обсягів відходів вуглевидобувної промисловості в Україні та їхній негативний вплив на довкілля внаслідок наявності осередків самозаймання. Проаналізовано сучасні підходи до моніторингу термічного стану відходів із використанням безпілотних літальних апаратів. Узагальнено можливості застосування мультисенсорних систем, зокрема RGB-, мультиспектральних, інфрачервоних камер і LiDAR-технологій. Висвітлено переваги інтегрованих підходів, що поєднують дистанційне зондування, 3D-моделювання та методи обробки даних. Обґрунтовано ефективність БПЛА для раннього виявлення зон самозаймання, підвищення точності локалізації та оперативності реагування. Визначено перспективи розвитку автоматизованих систем моніторингу на основі мультисенсорних платформ і технологій штучного інтелекту.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; мультисенсорний моніторинг; відходи вуглевидобутку; самозаймання; дистанційне зондування.





INTELLIGENT MULTISENSOR UAV SYSTEMS FOR REMOTE DETECTION OF THERMAL INSTABILITY IN COAL MINING WASTE

Ihor Chobotko¹

¹Senior Lecturer at the Department of Special Physical Training, e-mail: efilonov79@gmail.com

¹Dnipro State University of Internal Affairs

Abstract. The paper examines the issue of significant waste generation within the coal mining industry in Ukraine and its adverse environmental impact caused by spontaneous combustion sites. Current approaches to monitoring the thermal state of waste heaps using unmanned aerial vehicles (UAVs) are analyzed. The study summarizes the potential of multi-sensor systems, specifically RGB, multispectral, infrared cameras, and LiDAR technologies. It highlights the advantages of integrated approaches that combine remote sensing, 3D modeling, and data processing methods. The effectiveness of UAVs for the early detection of spontaneous combustion zones, improved localization accuracy, and rapid response is substantiated. Furthermore, the paper outlines prospects for developing automated monitoring systems based on multi-sensor platforms and artificial intelligence technologies.

Keywords: Unmanned aerial vehicles (UAVs), multisensor monitoring, coal mining waste, spontaneous combustion, remote sensing.

Вступ. Відповідно до положень Національного плану управління відходами до 2033 року [1] та Плану заходів з його реалізації на 2025–2033 роки [2], за даними Державної служби статистики України, у 2020 році в державі утворено понад 462,4 млн тонн відходів, з яких близько 85 % припадає на видобувну промисловість. Значна частина відходів вуглевидобутку характеризується наявністю осередків самонагрівання та самозаймання, що формують тривалі термічні аномалії. Такі процеси спричиняють деградацію компонентів довкілля гірничодобувних регіонів, зокрема атмосферного повітря, ґрунтів і підземних вод, а також становлять потенційну загрозу для прилеглих житлових територій [3, 4, 5, 6].

Початок повномасштабної агресії РФ проти України у 2022 році став каталізатором інтенсивного розвитку та широкого впровадження технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Наразі БПЛА трансформувалися з вузькоспеціалізованого інструмента у багатофункціональну платформу, що ефективно застосовується як у секторі безпеки і оборони, так і в цивільних галузях, зокрема в екологічному моніторингу та гірничій промисловості.

У контексті моніторингу термічного стану відходів вуглевидобутку БПЛА оснащуються різними типами сенсорів, вибір яких визначається характером поставлених завдань:



- камери видимого спектра (RGB), що забезпечують відео- та фотозйомку, трансляцію в реальному часі, проведення інспекцій, охоронний моніторинг;

- мультиспектральні камери, які застосовуються для оцінювання стану рослинності (індекси NDVI, NDRE), виявлення стресових станів біоти та аналізу ґрунтового покриву;

- тепловізійні (інфрачервоні) камери, призначені для виявлення температурних аномалій, моніторингу технічних об'єктів, ліній електропередач і зон самонагрівання;

- камери ближнього інфрачервоного діапазону (NIR), що дозволяють оцінювати вологість, біомасу та здійснювати дистанційний аналіз техногенних об'єктів;

- лідарні системи (LiDAR), які забезпечують високоточне тривимірне моделювання рельєфу, об'єктів і рослинного покриву, що є важливим для аналізу геометрії відвалів і динаміки їх змін.

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить про активний розвиток мультисенсорних підходів до моніторингу техногенних об'єктів. Зокрема, у роботі [7] розглянуто технічні аспекти використання різних сенсорів та рівні автономності польотів БПЛА. У роботі [8] описано інтегровану систему моніторингу самозаймання, яка забезпечує підвищення точності вимірювань і скорочення часу реагування, а також характеризується масштабованістю. У дослідженні [9] запропоновано комплексний підхід, що поєднує тепловізійну зйомку, пакетну обробку даних, фільтрацію псевдотемператур та 3D-моделювання, що суттєво підвищує точність локалізації осередків горіння.

У роботі [10] обґрунтовано переваги застосування БПЛА з тепловізійними сенсорами для раннього виявлення процесів самонагрівання порівняно з традиційними методами, підкреслено їх високу оперативність і точність. Дослідження [11] демонструє можливості інтеграції БПЛА з бездротовими сенсорними мережами для моніторингу газових та радіаційних показників, що підтверджено польовими випробуваннями. У [12] представлено метод тривимірного термального картографування із застосуванням фотограмметричних алгоритмів, який ефективно використовується для виявлення зон горіння.

Особливий інтерес становлять результати, наведені у [13] та [14], де доведено, що використання RGB-даних у поєднанні з аналізом біомаси може забезпечувати високу точність виявлення прихованих процесів самозаймання за значно менших витрат порівняно з тепловізійними системами. Це відкриває перспективи створення економічно ефективних систем моніторингу для великих територій. У [15, 16] узагальнено сучасні тенденції розвитку



БПЛА-технологій, включаючи застосування штучного інтелекту та глибокого навчання для автоматизованої обробки даних, що значно підвищує ефективність виявлення деформацій і термічних аномалій.

З позицій практичного впровадження слід зазначити, що найбільш перспективним напрямом є інтеграція мультисенсорних систем із алгоритмами машинного навчання для автоматичного виявлення та прогнозування процесів самозаймання. Поєднання даних різної природи (теплових, спектральних, геометричних) дозволяє сформувати більш повну інформаційну модель об'єкта, зменшити вплив похибок окремих сенсорів і підвищити достовірність результатів. Водночас актуальними залишаються питання стандартизації методик обробки даних, забезпечення метрологічної достовірності вимірювань і адаптації технологій до специфічних умов гірничодобувних регіонів України.

Мета роботи. Полягає у дослідженні та обґрунтуванні ефективності використання безпілотних літальних апаратів із мультисенсорними системами (RGB, тепловізійними, мультиспектральними, LiDAR) для моніторингу, раннього виявлення та локалізації осередків самозаймання відходів вуглевидобутку з метою підвищення екологічної безпеки гірничодобувних регіонів.

Матеріал і результат досліджень. У сучасних умовах інтенсивного розвитку гірничодобувної промисловості та накопичення значних обсягів відходів вуглевидобутку особливої актуальності набуває проблема екологічної безпеки териконів як складних геотехнічних систем. Ці об'єкти характеризуються високою схильністю до самозаймання, що супроводжується тривалими процесами тління, виділенням токсичних газів та негативним впливом на навколишнє середовище і здоров'я населення. Традиційні методи моніторингу таких об'єктів є обмеженими за оперативністю, небезпечними для персоналу та економічно затратними. У цьому контексті використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) із мультисенсорними системами відкриває нові можливості для дистанційного, високоточного та безпечного контролю стану відвалів.

Проведений аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що найбільш ефективним підходом є інтеграція різних типів сенсорів, зокрема RGB-камер, тепловізорів (TIR), мультиспектральних (MS) сенсорів та LiDAR-систем. Кожен із зазначених інструментів має власну функціональну специфіку, однак їх поєднання забезпечує синергетичний ефект, що значно підвищує достовірність і повноту отриманих даних. RGB-камери дозволяють отримувати високодеталізовані зображення поверхні та широко застосовуються у фотограмметрії для створення ортофотопланів і цифрових моделей рельєфу. Водночас вони обмежені видимим спектром і не дозволяють безпосе-



редньо виявляти термічні аномалії. Тепловізійні сенсори, навпаки, забезпечують можливість дистанційного вимірювання температурного поля об'єкта, що є критично важливим для виявлення осередків самозаймання. Мультиспектральні камери дозволяють оцінювати стан рослинного покриву за допомогою спектральних індексів, що опосередковано відображає підповерхневі термічні процеси. LiDAR-технології забезпечують формування високоточних тривимірних моделей рельєфу незалежно від щільності рослинності, що є важливим для аналізу геомеханічної стабільності відвалів.

Суттєвим науковим результатом є доведення ефективності мультисенсорного підходу, який дозволяє підвищити точність виявлення термічних аномалій на 20–40 % порівняно з використанням окремих сенсорів. Особливої уваги заслуговують дослідження, спрямовані на створення тривимірних термальних моделей відвалів. Такі підходи поєднують тепловізійну зйомку з фотограмметричною обробкою та алгоритмами просторової реконструкції, що дозволяє не лише виявляти осередки горіння, але й аналізувати їх просторову структуру та динаміку. Встановлено, що за оптимальних умов проведення зйомки точність визначення температурних аномалій може становити $\pm 1-2$ °C, що є достатнім для оперативного моніторингу та прийняття управлінських рішень.

Важливим напрямом досліджень є оцінка ефективності різних комбінацій сенсорів. Експериментальні результати свідчать, що використання лише RGB-даних забезпечує базовий рівень точності, однак їх поєднання з мультиспектральними або тепловізійними даними значно покращує результати аналізу. Максимальна ефективність досягається при комплексному використанні RGB, MS та TIR сенсорів. Водночас встановлено, що RGB-зображення можуть виступати як економічно доцільна альтернатива у випадках обмеженого фінансування, особливо при застосуванні методів машинного навчання.

Інтеграція алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання є одним із ключових факторів підвищення ефективності моніторингу. Застосування таких моделей, як Random Forest, Gradient Boosting, Support Vector Regression та інших, дозволяє автоматизувати процес обробки великих обсягів даних, зменшити вплив людського фактору та підвищити точність прогнозування. Одним із важливих результатів є встановлення стійкої залежності між температурою ґрунту та станом рослинного покриву: зростання температури супроводжується зменшенням біомаси. Це дозволяє використовувати рослинність як індикатор прихованих процесів самозаймання, що є особливо цінним на ранніх стадіях, коли поверхневі температурні зміни ще незначні.



Окрему увагу приділено дослідженням деградації земель і ерозійних процесів на територіях відвалів. Інтеграція даних БПЛА, супутникових знімків та польових вимірювань дозволяє комплексно оцінювати стан територій після рекультивації. Встановлено, що ключовими факторами деградації є експозиція схилів та рівень рослинного покриву. Це дає змогу розробляти адаптивні заходи управління, спрямовані на стабілізацію ґрунтів і відновлення екосистем.

Практична цінність використання БПЛА підтверджується також у дослідженнях, присвячених ліквідації осередків самозаймання. Застосування дронів для теплового картографування дозволяє точно локалізувати зони підземного горіння, визначати їх глибину та взаємозв'язки між поверхневими і глибинними процесами. Це створює основу для ефективного планування заходів з гасіння, зокрема буріння, ін'єкції спеціальних сумішей та подальшої рекультивації. Таким чином, БПЛА виступають не лише інструментом моніторингу, але й важливим елементом системи управління ризиками.

Порівняльний аналіз технологій показує, що кожен тип сенсорів має свої переваги та обмеження. RGB-камери є найбільш доступними та простими у використанні, але не забезпечують спектрального аналізу. Тепловізійні системи є незамінними для виявлення температурних аномалій, однак характеризуються вищою вартістю та нижчою просторовою роздільною здатністю. Мультиспектральні сенсори забезпечують глибокий аналіз рослинності, але потребують складної обробки даних. LiDAR-системи є найбільш точними для створення тривимірних моделей, проте їх використання обмежене високою вартістю та вимогами до технічного забезпечення. У зв'язку з цим найбільш перспективним є саме інтегрований підхід, що дозволяє компенсувати недоліки окремих технологій.

Географічний аналіз застосування БПЛА свідчить, що лідером у цій сфері є Китай, що зумовлено масштабами видобутку вугілля та наявністю значної кількості об'єктів, схильних до самозаймання. Водночас Україна демонструє високий потенціал розвитку даного напрямку, особливо з урахуванням стрімкого розвитку технологій БПЛА в умовах воєнного часу. Наявність значного парку безпілотних систем, підготовлених операторів та виробничих потужностей створює передумови для їх широкого впровадження у цивільних галузях, зокрема у гірничій промисловості.

Очікується, що у післявоєнний період БПЛА стануть важливим інструментом екологічного моніторингу, що дозволить значно знизити витрати на проведення досліджень, підвищити їх безпеку та ефективність. Особливу роль відіграватиме інтеграція БПЛА з геоінформаційними системами та



створення національних баз даних небезпечних об'єктів. Це дозволить забезпечити системний підхід до управління екологічними ризиками та сприятиме сталому розвитку гірничих регіонів.

Висновки. Таким чином, результати проведеного аналізу свідчать, що використання БПЛА з мультисенсорними системами та алгоритмами машинного навчання є перспективним і науково обґрунтованим напрямом розвитку систем екологічного моніторингу. Такі технології забезпечують високий рівень точності, оперативності та безпеки, дозволяють автоматизувати процеси обробки даних і прогнозування ризиків, а також створюють основу для формування цифрових моделей геотехнічних систем. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із удосконаленням алгоритмів обробки даних, розробкою автономних систем моніторингу та розширенням можливостей інтеграції з іншими інформаційними технологіями.

ЛІТЕРАТУРА

1. План заходів : додаток до Національного плану з реалізації Національного плану управління відходами на 2025-2033 роки / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/123/f542151n27.pdf> (дата звернення: 14.04.2026).
2. Про затвердження Національного плану управління відходами до 2033 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 груд. 2024 р. № 1353-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/123/f542151n26.pdf> (дата звернення: 14.04.2026).
3. Чоботько І. І. Обґрунтування параметрів вибору обладнання для гасіння відходів вуглевидобутку / І. І. Чоботько // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2021. – № 2(49). – С. 68–77. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-68-77>
4. Грінюв В. Г. Дослідження основ технології оптимального проектування раціонального користування родовищами цінних копалин / В. Г. Грінюв, А. О. Хорольський // Мінеральні ресурси України. – 2020. – № 2. – С. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2020.2.19-24>
5. Чоботько І. І. Обґрунтування способів та методів усунення самозаймання відходів гірничого виробництва / І. І. Чоботько // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2022. – № 1(50). – С. 166–171. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-166-171>
6. Грінюв В. Нові підходи і результати досліджень по раціоналізації відпрацювання родовищ корисних копалин / В. Грінюв, А. Хорольський // Физико-технические проблемы горного производства. – 2021. – № 23. – С. 178–203. DOI: <https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.012>
7. Priority areas for the application of UAV with multisensor systems for monitoring / S. Tynyna, I. Chobotko, I. Kulak, O. Kushch // Modern Engineering and Innovative Technologies. – 2025. – № 2(42-02). – С. 126–140. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-42-02-012>
8. Comprehensive review of unmanned aerial vehicle application to safety mining management / T. P. T. Do, Long Quoc Nguyen, Le Hung Trinh, V. Vambol // Ecological Questions. – 2024. – Vol. 35, № 4. – P. 69–90. DOI: <https://doi.org/10.12775/EQ.2024.049>.



9. Про моніторинг геомеханічних систем які знаходяться під техногенним впливом / С. В. Тинина, І. І. Чоботько, Є. А. Кулак, Г. М. Шевельова // Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва. – 2023. – № 25. – С. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.011>.
10. Monitoring Burning Coal Gangue Dump Based on the 3-D Thermal Infrared Model / Z. Shao, T. Yang, R. Deng, H. Shao // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2024. – Vol. 17. – P. 8979–8995. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3391009>.
11. Кодунов Б. О. Застосування безпілотних літальних апаратів для теплової зйомки відвалів / Б. О. Кодунов, О. О. Давиденко // Технології і процеси в гірництві та будівництві : матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. – Донецьк : ДонНТУ, 2021. – С. 113–118. – URL: https://donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/07/zbirka-tez_2021_compressed.pdf#page=113 (дата звернення: 14.04.2026).
12. Chumachenko S. Automation of monitoring of background radiation and hazardous gas emissions from coal waste dumps using UAV and wireless sensor networks in combat conditions / S. Chumachenko, O. Samoilenko, M. Karpenko // Міжнародний Науковий Журнал «Military Science». – 2025. – Vol. 2, № 4. – P. 72–82. – DOI: <https://doi.org/10.62524/msj.2024.2.4.6>.
13. Three-dimensional-imaging thermal surfaces of coal fires based on UAV thermal infrared data / Z. Shao, Y. Li, R. Deng [et al.] // International Journal of Remote Sensing. – 2021. – Vol. 42, № 2. – P. 672–692. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1823044>.
14. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Vegetation Restoration Monitoring in Coal Waste Dumps after Reclamation / H. Ren, Y. Zhao, W. Xiao, L. Zhang // Remote Sensing. 2024. – Vol. 16, № 5. – Art. 881. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050881>.
15. Muoi Duy NGUYEN Identifying the Potential Application of Unmanned Aerial Vehicle Technology in Mine Waste Dumps / Muoi Duy NGUYEN, Anh Ngoc LE, Hoa Minh NGUYEN, Ngan Thi BUI, Ba Dung NGUYEN // Inzynieria Mineralna. – 2023. – Vol. 1, № 2. – P. 155-172. DOI: <https://doi.org/10.29227/IM-2023-02-24>.
16. Monitoring potential spontaneous combustion in a coal waste dump after reclamation through unmanned aerial vehicle RGB imagery based on alfalfa aboveground biomass / H. Ren, Y. Zhao, W. Xiao [et al.] // Land Degradation & Development. – 2022. – Vol. 33, № 15. – P. 2728–2742. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.4297>.

УДК 636.083:631.364

СУЧАСНІ ЕЛЕКТРИФІКОВАНІ ЗАСОБИ ПРИБИРАННЯ ГНОЮ У ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ

В.І. Ребенко¹, Н. Рапавий²

¹к.т.н., доцент кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві, e-mail: rebenko@nubip.edu.ua

²студент групи AI-2301, e-mail: ai23-n.rapavyi@nubip.edu.ua

^{1,2}Національний університет біоресурсів і природокористування України