

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.85:504.4.054:502.131.1:005.584(4)
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/22>

Валерко Р.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Пацева І.Г.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Герасимчук Л.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Кириленко Н.П.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Бондарчук В.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ІНТЕГРАЦІЯ ESG-КРИТЕРІЇВ ТА СТАНДАРТІВ ЄС У СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ КАР'ЄРНИМИ ВОДАМИ ГІРНИЧОЇ ГАЛУЗІ: ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ, МОНІТОРИНГ ТА ІНСТРУМЕНТИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

У статті представлено результати комплексного аналізу інтеграції ESG-критеріїв та нормативно-правових стандартів Європейського Союзу у систему управління кар'єрними водами гірничодобувних підприємств. Обґрунтовано необхідність модернізації водного менеджменту з огляду на зростання техногенного навантаження на гідросферу, посилення екологічних ризиків і вимог стейкхолдерів щодо прозорості екологічної діяльності. Встановлено, що кар'єрні води являють собою багатокомпонентний техногенний потік, у складі якого переважають сульфати, хлориди, завислі речовини, важкі метали та продукти окиснення сульфідовмісних порід, що зумовлює ризики вторинного забруднення поверхневих і підземних вод та формування кислотного дренажу. Систематизовано вимоги ключових регуляторних документів ЄС, зокрема, Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС, Директиви 2006/21/ЄС щодо відходів добувної промисловості, Директиви 2010/75/EU (IED) та Регламенту 2020/852 (Таксономія ЄС), які визначають критерії оцінювання екологічного стану вод, підходи до управління ризиками та необхідність застосування найкращих доступних технологій у сфері очищення та моніторингу техногенних вод. Показано, що ESG-підхід формує методологічну основу для поєднання екологічних, соціальних і управлінських індикаторів сталого водокористування, сприяє підвищенню корпоративної відповідальності, мінімізації впливу на водні ресурси та посиленню екологічної безпеки гірничих регіонів. Особливу увагу приділено цифровим інструментам моніторингу – IoT-сенсорам, ГІС-технологіям і цифровим двійникам, які забезпечують високоточну діагностику, автоматизоване відстеження динаміки параметрів води та моделювання можливих сценаріїв трансформації водних потоків. Запропоновано концептуальну модель ESG-орієнтованого управління кар'єрними водами, що поєднує вимоги європейського регуляторного поля, цифрові технології, циркулярні підходи до водокористування та інструменти екологічного менеджменту. Практична реалізація моделі сприятиме зменшенню техногенного навантаження, підвищенню ефективності моніторингу та гармонізації української гірничої галузі з європейськими стандартами сталого розвитку.

Ключові слова: кар'єрні води, гірничодобувна промисловість, екологічні ризики, сталий розвиток, ESG-підхід, управління водними ресурсами, екологічна відповідальність, екологічна політика ЄС.

Постановка проблеми. Гірничодобувна галузь формує значний техногенний тиск на водні ресурси, а кар'єрні води є одним з найбільш проблемних потоків забруднення. За даними досліджень, дренажні та шахтно-кар'єрні води спричиняють підвищення мінералізації, засолення, закислення та накопичення важких металів у річкових і підземних водних системах, що призводить до деградації біорізноманіття та погіршення екологічного стану водойм [1–3]. У межах реалізації Водної рамкової директиви ЄС 2000/60/ЄС (WFD) до 2027 року держави мають забезпечити досягнення «доброго» хімічного та екологічного стану вод, однак виконання цієї вимоги у регіонах гірничої діяльності залишається проблемним [4, 5].

Водночас ЄС запроваджує нові інструменти сталого розвитку, а саме: EU Taxonomy, ESG-звітність, оновлені вимоги до прозорості екологічних даних, які прямо стосуються водокористування та водного впливу гірничих підприємств. ESG-підходи визнані ефективним механізмом зменшення екологічних ризиків і стимулювання екологічних інновацій у водному секторі.

Для України, що адаптує екологічне законодавство до стандартів ЄС, питання інтегрованого управління кар'єрними водами є особливо важливим у контексті модернізації промисловості й переходу до сталого видобутку. Саме тому розроблення моделі, яка поєднує вимоги WFD, ESG-критерії та інструменти сталого водного менеджменту, є своєчасним і науково значущим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика впливу гірничодобувної діяльності на водне середовище активно розглядається у сучасній науковій літературі [6–8]. Численні дослідження підтверджують, що скидання кар'єрних вод є одним із провідних чинників деградації поверхневих водних екосистем, зокрема через підвищення концентрацій заліза, марганцю, сульфатів, азотовмісних сполук та зниження рН, що погіршує якість води та екологічний статус водотоків [1–3].

Проблема впливу гірничодобувної діяльності на водне середовище все частіше розглядається крізь призму ESG-підходів та європейських екологічних стандартів. У низці робіт показано, що для сучасних гірничих підприємств ключовим стає управління ESG-ризиками на всіх стадіях життєвого циклу родовища, зокрема щодо водокористування та забруднення водних ресурсів [9], а також пріоритизація саме водних ESG-ризиків у регіонах із напруженою водогосподарською ситуацією [10]. У секторі водного господарства ESG-підходи розглядаються як драйвер сталих інновацій, що мають поєднувати екологічну результативність,

прозорість розкриття інформації та відповідність цілям сталого розвитку [11]. Європейські дослідження, присвячені соціальним та екологічним наслідкам гірничої діяльності та впливу політики ЄС на процедури дозволів, підкреслюють зростаючу роль Водної рамкової директиви (2000/60/ЄС) та пов'язаних з нею вимог до охорони водних екосистем і водозаборів у контексті видобутку корисних копалин [12].

Окремий напрямок становлять роботи, спрямовані на формування методології та показників ESG-звітності, у тому числі для водного менеджменту. Прикладні дослідження щодо гірничих компаній демонструють, що блоку «Е» (environmental) дедалі частіше включає показники забору води, скидів забруднених вод, ступеня очищення та інвестицій у водоохоронні заходи, хоча деталізація саме кар'єрних вод залишається недостатньою [13].

Паралельно розвивається напрямок цифрових систем моніторингу, що поєднують сенсорні мережі, технології інтернету речей (IoT), дистанційне зондування Землі та GIS-платформи для безперервного контролю якості води. Оглядові публікації засвідчують швидкий розвиток сенсорних технологій для моніторингу гідрохімічних показників, застосування методів машинного навчання для інтерпретації великомасштабних даних і підтримки прийняття рішень у водному менеджменті [14, 15]. Розвиток дистанційного зондування та GIS демонструє потенціал просторово-часового аналізу водних об'єктів, зокрема у районах інтенсивного природокористування [16]. Водночас класичні роботи з управління кар'єрними та шахтними водами у контексті Водної рамкової директиви наголошують на необхідності інтегрованого, басейнового підходу, врахування постмайнінгової фази та довгострокових зобов'язань щодо якості води [17].

Попри наявність розвинених концепцій ESG, цифрового моніторингу та європейських нормативних вимог, досі бракує прикладних досліджень, що комплексно поєднують ці три складові саме в системах управління кар'єрними водами гірничої галузі. Запропонована у статті постановка задачі спрямована на заповнення цієї прогалини, зосереджуючись на оцінці екологічних ризиків, цифровізації моніторингу та адаптації вимог європейського водного законодавства до практики управління кар'єрними водами.

Постановка завдання. Метою статті є обґрунтування науково-методичних підходів до інтеграції ESG-критеріїв та екологічних стандартів Європейського Союзу у систему управління кар'єрними водами підприємств гірничої галузі з урахуванням сучасних екологічних ризиків,

зростаючих вимог стейкхолдерів та принципів сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу. Кар'єрні води є складним техногенно-геохімічним утворенням, що формується внаслідок сукупної дії природних та антропогенних факторів. Їхнє утворення зумовлюється інфільтрацією атмосферних опадів, надходженням ґрунтово-напірних вод, порушенням гідрогеологічних структур та впливом вибухових і транспортних операцій. За сучасними дослідженнями, гідрохімічні характеристики кар'єрних вод визначаються мінеральним складом гірських порід, інтенсивністю окисно-відновних процесів та техногенними потоками забруднювачів.

Суттєвими екологічними ризиками є:

- зростання мінералізації та сульфатності, що призводить до порушення осмотичного режиму водних організмів;

- підвищені концентрації завислих речовин, які спричиняють замулення русел та деградацію нерестових ділянок;

- формування кислотного дренажу (AMD) через окиснення сульфідовмісних порід;

- міграція важких металів та токсичних мікроелементів у зв'язаній та розчинній формах;

- гідрологічна трансформація водозборів, пов'язана з відкачуванням та скидом вод, що може призводити до зниження рівнів підземних вод.

Наявність таких ризиків свідчить про необхідність інтегрованого управління кар'єрними водами відповідно до критеріїв Водної рамкової директиви ЄС, зокрема щодо запобігання погіршенню екологічного стану водних масивів та обмеження техногенного навантаження.

У межах європейської екологічної політики питання техногенних вод регулюється низкою директив і стандартів, що формують комплексну систему управління ризиками. Найбільш значущими для гірничих підприємств є:

1. Водна рамкова директива 2000/60/ЄС, яка визначає критерії досягнення «доброго екологічного стану» поверхневих та підземних вод, упроваджує басейновий принцип управління та вимагає систематичного моніторингу.

2. Директива 2006/21/ЄС щодо управління відходами добувної промисловості, яка регламентує порядок поводження з шахтно-кар'єрними водами як із специфічною формою рідких відходів.

3. Директива 2010/75/EU (IED), яка зобов'язує підприємства застосовувати найкращі доступні технології (BAT) для мінімізації викидів у довкілля, включно з техногенними водами.

4. Регламент ЄС 2020/852 (Таксономія ЄС), що визначає екологічні критерії сталості опера-

цій підприємств і встановлює принцип «Do No Significant Harm» для водних ресурсів.

5. CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive), яка вводить обов'язкову нефінансову звітність та розширені показники водокористування.

Гармонізація українського законодавства з наведеними регуляторними актами створює передумови для модернізації системи управління кар'єрними водами відповідно до європейських стандартів екологічної безпеки та сталого розвитку.

Концепція ESG перетворюється на ключовий інструмент оцінювання екологічно відповідального ведення бізнесу у гірничому секторі. Інтеграція ESG-компонентів у менеджмент кар'єрних вод дозволяє формувати системну модель екологічного управління, що включає екологічний, соціальний та управлінський виміри системи управління кар'єрними водами (рис. 1).



Рис. 1. ESG-критерії в управлінні кар'єрними водами

Таким чином, ESG-фреймворк виконує роль універсального механізму гармонізації технологічних, екологічних та управлінських аспектів водного менеджменту.

Удосконалення системи моніторингу кар'єрних вод є ключовою умовою мінімізації ризиків і забезпечення відповідності європейським стандартам. На сучасному етапі найбільшу ефективність демонструють цифрові технології такі як: інтернет речей (IoT), ГІС, концепція цифрового двійника (Digital Twin).

Мережі IoT-сенсорів забезпечують безперервний контроль параметрів якості води (рН, електропровідність, Eh, концентрації SO_4^{2-} , Fe, Mn, важких металів) із високою часовою роздільною здатністю. Використання автоматизованих систем передавання даних дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормативів і реагувати на потенційні аварійні ситуації.

ГІС-технології сприяють просторовому аналізу та картографуванню зон впливу, моделюванню міграції забруднювачів, оцінці водного балансу та визначенню екологічно вразливих територій. Інтеграція ГІС із польовими даними створює основу для ухвалення управлінських рішень.

Digital Twin дозволяє моделювати гідродинамічні процеси та поведінку домішок у режимі реального часу, оцінювати ефективність різних сценаріїв очищення та прогнозувати зміни у разі впровадження нових технологій. Це забезпечує перехід від реактивного до превентивного управління техногенними водами.

Комплекс заходів сталого управління кар'єрними водами охоплює:

- циркулярне водокористування, що передбачає повторне застосування технічних вод у виробничих процесах;
- оптимізацію дренажних систем із метою зниження обсягів відкачування;
- модернізацію очисних споруд шляхом впровадження високоефективних технологій осадження, коагуляції, мембранної фільтрації, біоремедіації;
- екологічну логістику водних потоків, спрямовану на мінімізацію транспортування забруднених вод;
- створення систем нефінансової звітності, сумісних із CSRD, GRI та ISO 14046 (водний слід).

Застосування таких інструментів формує інтегровану модель управління, що відповідає європейським стандартам екологічної безпеки та принципам сталого розвитку.

Отже, на основі проведеного аналізу розроблено концептуальну модель інтегрованого управління кар'єрними водами, яка включає:

1. Ідентифікацію екологічних ризиків та визначення компетенцій відповідно до директив ЄС.
2. Створення комплексної системи моніторингу, що базується на IoT, ГІС і аналітичних платформах.
3. Використання цифрового моделювання для прогнозування поведінки водних потоків та оцінювання ефективності різних сценаріїв очищення.

4. Інтеграцію ESG-критеріїв у корпоративне управління водними ресурсами.

5. Розроблення стратегії сталого водокористування, орієнтованої на мінімізацію негативного впливу на довкілля та виконання міжнародних стандартів.

Застосування зазначеної моделі дозволяє забезпечити високий рівень екологічної безпеки гірничих підприємств, підвищити ефективність водного менеджменту та сприяти формуванню конкурентоспроможної та екологічно відповідальної гірничої галузі.

Висновки. Дослідження підтвердило, що кар'єрні води є суттєвим техногенним чинником впливу на водні екосистеми, а їхній хімічний склад і обсяги формують високі екологічні ризики. Найвні підходи до управління цими водами не забезпечують повної відповідності сучасним екологічним вимогам та потребують модернізації.

Аналіз регуляторних документів ЄС засвідчив, що впровадження положень Водної рамкової директиви, Директиви щодо відходів добувної промисловості, Директиви IED та Регламенту ЄС 2020/852 формує чіткі вимоги щодо моніторингу, очищення та контролю техногенних вод. Їх імплементація є ключовою умовою підвищення екологічної безпеки гірничих підприємств.

Інтеграція ESG-критеріїв визначена як ефективний механізм удосконалення системи водного менеджменту, оскільки дозволяє поєднати технологічні, екологічні, соціальні та управлінські аспекти діяльності підприємств.

Встановлено, що застосування цифрових технологій, а саме: IoT-моніторингу, ГІС-аналізу та цифрових двійників забезпечує підвищення точності контролю та прогнозування стану кар'єрних вод і сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Запропонована модель ESG-орієнтованого управління кар'єрними водами сприяє зменшенню техногенного навантаження, гармонізації з вимогами ЄС та переходу гірничих підприємств до принципів сталого розвитку.

Список літератури:

1. Santana C. S., Montalván Olivares D. M., Silva V. H. C., Luzardo F. H. M., Velasco F. G. Assessment of water resources pollution associated with mining activity in a semi-arid region. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 273. 111148. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111148>.
2. Mitko K., Dydo P., Milewski A. K., Bok-Badura J., Jakóbiak-Kolon A., Krawczyk T., Cieplok A., Krodkiewska M., Spyra A., Gzyl G., et al. Mine Wastewater Effect on the Aquatic Diversity and the Ecological Status of the Watercourses in Southern Poland. *Water*. 2024. 16(9). 1292. <https://doi.org/10.3390/w16091292>.
3. Cesar Minga J., Elorza F. J., Rodriguez R., Iglesias A., Esenarro D. Assessment of Water Resources Pollution Associated with Mining Activities in the Parac Subbasin of the Rimac River. *Water*. 2023. 15(5). 965. <https://doi.org/10.3390/w15050965>.
4. Voulvoulis N., Arpon K. D., Giakoumis T. The EU Water Framework Directive: From great expectations to problems with implementation. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 575. P. 358–366. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.228.

5. Pellegrini E., Dalmazzone S., Fasolino N. G., Frontuto V., Gizzi P., Luppi F., Moroni F., Raggi M., Zanni G., Viaggi D. Economic Analysis under the Water Framework Directive: The State of the Art and Way forward. *Water*. 2023; 15(23). 4128. <https://doi.org/10.3390/w15234128>.
6. Валерко Р. А., Бондарчук В. М., Герасимчук Л. О. Екологічна оцінка якості поверхневих вод у зоні діяльності підприємств гірничо-видобувної галузі. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2025. Вип. 4(153). С. 73–81. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.4.8>.
7. Валерко Р. А., Бондарчук В. М., Герасимчук Л. О. Кореляційний аналіз показників складу кар'єрних вод у контексті оцінки антропогенного навантаження на річкові екосистеми. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 4(61). С. 135–140. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.22>.
8. Bondarchuk V. M., Valerko R. A. Identification of pollution sources and clustering of hydrochemical parameters of quarry water in the area of mining enterprise operations. *Science and education under the influence of global challenges : proceedings of the II International scientific and practical conference / International Humanitarian Research Center (Chernihiv, 2025, July 15)*. Research Europe, 2025. P. 60–63. DOI: <https://doi.org/10.64076/ihrc250715.09>.
9. Maybee B., Lilford E., Hitch M. Environmental, Social and Governance (ESG) risk, uncertainty, and the mining life cycle. *The Extractive Industries and Society*. 2023. Art. 101244. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101244>.
10. Garcia-Zavala C., Ordens C.M., Pagliero L., Lèbre E., Stringer M. An approach for prioritising environmental, social and governance (ESG) water-related risks for the mining industry: The case of Chile. *The Extractive Industries and Society*. 2023. Article 101259. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101259>.
11. Minea G., Lakatos E. S., Druta R. M., Moldovan A., Lupu L. M., Cioca L. I. The Role of ESG in Driving Sustainable Innovation in Water Sector: From Gaps to Governance. *Water*. 2025. 17(15). 2259. <https://doi.org/10.3390/w17152259>.
12. Streit S., Passarella M., Tost M. The influence of environmental policies on mineral permitting in Europe: Challenges and insights from Spain and Sweden. *The Extractive Industries and Society*. 2025. Vol. 24. Article 101727. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101727>.
13. Pavloudakis F., Kirtikidis S., Roumpos C., Agioutantis Z.G. ESG Reporting in the Mining Sector: Case Studies from Greek Industry Leaders. In: *Proceedings of Sustainable Development in the Minerals Industry (SDIMI 2024)*, 9 - 11 July 2024, Turin, Italy. P. 73–77.
14. Chen H., Gao X., Yuan R. Advances in Remote Sensing and Sensor Technologies for Water-Quality Monitoring: A Review. *Water*. 2025. 17(20). 3000. <https://doi.org/10.3390/w17203000>.
15. Dharmarathne G., Abekoon A.M.S.R., Bogahawaththa M., Alawatugoda J., Meddage D.P.P. A review of machine learning and internet-of-things on the water quality assessment: Methods, applications and future trends. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. 105182. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105182>.
16. Parra L. Remote Sensing and GIS in Environmental Monitoring. *Applied Sciences*. 2022. 12(16). 8045. <https://doi.org/10.3390/app12168045>.
17. Wolkersdorfer Ch. Mine Water Management and the Water Framework Directive. In: *Proceedings Post-Mining 2005*. Nancy, 2005. P. 1–8.

Valerko R.A., Patseva I.H., Herasymchuk L.O., Kyrylenko N.P., Bondarchuk V.M. INTEGRATION OF ESG CRITERIA AND EU STANDARDS INTO THE MINE WATER MANAGEMENT SYSTEM OF THE MINING INDUSTRY: ENVIRONMENTAL RISKS, MONITORING, AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT TOOLS

The article presents the results of a comprehensive analysis of the integration of ESG criteria and the regulatory standards of the European Union into the mine water management system of mining enterprises. The necessity of modernizing water management is substantiated in view of the increasing technogenic pressure on the hydrosphere, the intensification of environmental risks, and the growing demands of stakeholders for transparency in environmental performance. It is established that mine water represents a multicomponent technogenic flow dominated by sulfates, chlorides, suspended solids, heavy metals, and oxidation products of sulfide-bearing rocks, which pose significant risks of secondary contamination of surface and groundwater, as well as the formation of acid mine drainage. The requirements of key EU regulatory documents are systematized, including the Water Framework Directive 2000/60/EC, Directive 2006/21/EC on the management of waste from extractive industries, Directive 2010/75/EU (IED), and Regulation 2020/852 (EU Taxonomy), which define criteria for assessing the ecological status of water bodies, approaches to risk management, and the necessity of implementing best available techniques (BAT) for the treatment and monitoring of technogenic waters. It is shown that the ESG approach forms a methodological basis for integrating ecological, social, and governance indicators of sustainable water use, strengthening corporate responsibility, minimizing impacts on water resources, and enhancing environmental safety in mining regions. Particular attention is devoted to digital monitoring tools – IoT sensors, GIS technologies, and digital twins which ensure high-precision diagnostics, automated tracking of water quality dynamics, and modelling of potential scenarios of water flow transformation. A conceptual model of ESG-oriented mine water management is proposed, combining EU regulatory requirements, digital technologies, circular water-use approaches, and instruments of environmental management. Practical implementation of the model will contribute to reducing technogenic pressure, improving monitoring efficiency, and harmonizing the Ukrainian mining industry with European sustainable development standards.

Key words: mine water, mining industry, environmental risks, sustainable development, ESG approach, water resource management, environmental responsibility, EU environmental policy.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 12.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025