

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ СКЛАДУ КАР'ЄРНИХ ВОД У КОНТЕКСТІ ОЦІНКИ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РІЧКОВІ ЕКОСИСТЕМИ

Валерко Р.А., Бондарчук В.М., Герасимчук Л.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

valerko_ruslana@ukr.net, kvm_bvm@ztu.edu.ua, gerasim4uk@ukr.net

У статті досліджено гідрохімічний склад кар'єрних вод ПрАТ «Транснаціональна корпорація «Граніт», яка функціонує у межах Коростенського району Житомирської області, що скидаються у річку Уж, з метою оцінки їхнього впливу на річкову екосистему. Моніторинг, проведений у 2021–2023 роках, охоплював 13 показників, серед яких: рН, амонійний азот, нітрити, нітрати, залізо загальне, фосфати, ХСК, БСК₅, хлориди, сульфати, сухий залишок, завислі речовини. Проаналізовано взаємозв'язки між показниками рН, азоту амонійного, нітритів, нітратів, заліза загального, фосфатів, ХСК, БСК₅, хлоридів, сульфатів, сухого залишку та завислих речовин.

Кореляційний аналіз показав сильні позитивні зв'язки між ХСК і сульфатами ($r = 0,94$), амонійним азотом і ХСК ($r = 0,85$), а також між хлоридами і сухим залишком ($r = 0,86$), що вказує на наявність органічного та мінерального навантаження. Висока кореляція між БСК₅ і фосфатами ($r = 0,72$) свідчить про біогенне забруднення, ймовірно, побутового походження. Помірні зв'язки між БСК₅, сульфатами, сухим залишком і залізом загальним свідчать про участь колоїдних та органічних форм у процесах мінералізації. Водночас, встановлено сильні негативні кореляції: між рН і хлоридами ($r = -0,89$), рН і сухим залишком ($r = -0,86$), що вказує на зниження лужності з ростом мінералізації. Практично нульовий зв'язок між залізом і ХСК ($r = -0,047$), а також між залізом і нітратами ($r = 0,011$) свідчить про незалежні джерела формування цих компонентів.

Отримані результати дозволяють ідентифікувати основні джерела забруднення та запропонувати кореляційний підхід як інструмент оцінки антропогенного впливу на водні екосистеми. Методологія може бути використана в системі моніторингу, оцінки ризиків і планування природоохоронних заходів. *Ключові слова:* кар'єрні води, кореляційний аналіз, гідрохімія, техногенне навантаження, річкові екосистеми.

Correlation Analysis of Quarry Water Composition Indicators in the Context of Assessing Anthropogenic Pressure on River Ecosystems. Valerko R., Bondarchuk V., Herasymchuk L.

The article examines the hydrochemical composition of quarry waters discharged by PJSC “Transnational Corporation Granit,” operating within the Korosten district of Zhytomyr region, into the Uzh River, aiming to assess their impact on the river ecosystem. Monitoring conducted during 2021–2023 covered 13 indicators, including: pH, ammonium nitrogen, nitrites, nitrates, total iron, phosphates, COD, BODs, chlorides, sulfates, total dissolved solids (TDS), and suspended solids. Correlations between the parameters were analyzed: pH, ammonium nitrogen, nitrites, nitrates, total iron, phosphates, COD, BODs, chlorides, sulfates, TDS, and suspended solids.

Correlation analysis revealed strong positive relationships between COD and sulfates ($r = 0.94$), ammonium nitrogen and COD ($r = 0.85$), as well as between chlorides and TDS ($r = 0.86$), indicating the presence of both organic and mineral pollution. A strong correlation between BODs and phosphates ($r = 0.72$) points to biogenic contamination, likely of domestic origin. Moderate correlations between BODs, sulfates, TDS, and total iron suggest the involvement of colloidal and organic forms in mineralization processes. Meanwhile, strong negative correlations were found between pH and chlorides ($r = -0.89$), pH and TDS ($r = -0.86$), indicating a decrease in alkalinity with increasing mineralization. Virtually no correlation was observed between iron and COD ($r = -0.047$), as well as between iron and nitrates ($r = 0.011$), suggesting different sources and behavior of these components.

The obtained results make it possible to identify the main sources of pollution and propose a correlation-based approach as a tool for assessing anthropogenic pressure on river ecosystems. The methodology can be applied in monitoring systems, risk assessment, and planning of environmental protection measures. *Key words:* quarry water, correlation analysis, hydrochemistry, anthropogenic pressure, river ecosystems.

Постановка проблеми. Гірничодобувна діяльність, зокрема видобуток і переробка гранітних порід, супроводжується утворенням значного обсягу шахтно-кар'єрних вод, які скидаються у прилеглі водні об'єкти. Такі води часто мають специфічний хімічний склад, обумовлений як природними геохімічними особливостями, так і техногенним впливом. Річкові екосистеми є вразливими до змін гідрохіміч-

ного режиму, що може призводити до деградації біоти, погіршення якості води та втрати екосистемних послуг.

Актуальність дослідження. Зростання інтенсивності гірничодобувної діяльності в Україні та світі зумовлює посилення антропогенного навантаження на водні екосистеми, що створює серйозні екологічні загрози. Особливу стурбованість викликає вплив

шахтно-кар'єрних вод, які у процесі експлуатації родовищ потрапляють до поверхневих водних об'єктів і змінюють їх гідрохімічний режим. Це, у свою чергу, може призводити до накопичення токсичних речовин, евтрофікації, зниження біорізноманіття та деградації водних ресурсів [1, 2]. В умовах сучасних викликів, пов'язаних із необхідністю забезпечення сталого водокористування та охорони водного середовища, надзвичайно актуальним є дослідження просторових і хімічних закономірностей поширення забруднення в районах функціонування гірничодобувних підприємств [3, 4].

На сьогоднішній день існує потреба в розробці науково обґрунтованих підходів до ідентифікації джерел забруднення і кластеризації гідрохімічних параметрів як інструменту для екологічного моніторингу та оцінки ризиків [5, 6]. Проведення кореляційного та кластерного аналізу показників складу кар'єрних вод дозволяє не лише виявити критичні фактори впливу, але й оптимізувати природоохоронні заходи з урахуванням регіональних особливостей [7].

Зв'язок авторського доробку із важливими та практичними завданнями. Запропоновані у статті підходи до аналізу гідрохімічного складу кар'єрних вод із використанням кореляційно-кластерного моделювання спрямовані на виявлення основних чинників забруднення та диференціацію джерел надходження шкідливих речовин у поверхневі води. Що дозволить покращити систему екологічного моніторингу, забезпечити ефективний контроль за дотриманням екологічного законодавства та обґрунтувати управлінські рішення щодо оптимізації режиму скидів.

Дослідження має прикладне значення для екологічної оцінки впливу підприємств добувної галузі на водні об'єкти, а також може використовуватись органами місцевого самоврядування, екологічними службами та водогосподарськими організаціями під час планування заходів з очищення вод, адаптації інженерних споруд, запровадження превентивного моніторингу та екологічної експертизи проектів. Крім того, дані та методи можуть бути інтегровані в систему екологічного управління промисловими об'єктами, що відповідає вимогам сталого розвитку та європейської інтеграції екологічної політики України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема впливу гірничодобувної діяльності на водне середовище активно висвітлюється у сучасній науковій літературі. Ряд досліджень підтверджує, що скидання кар'єрних вод до поверхневих водних об'єктів є одним із ключових факторів деградації водних екосистем, зокрема через підвищення концентрацій заліза, марганцю, сульфатів, азотовмісних сполук і зниження рН [8, 9, 10].

Виділяються дослідження, присвячені використанню статистичних методів для аналізу якості води.

Наприклад, Khorashadi Zadeh та ін. успішно застосували кластерний та компонентний аналіз для ідентифікації зон забруднення у річкових системах, що зазнають впливу антропогенного навантаження [5]. Подібний підхід був використаний також у дослідженнях Tutu та ін. для класифікації гідрохімічних процесів у регіонах, уражених кислотним дренажем шахт [4]. Значна увага в сучасних публікаціях приділяється необхідності адаптації концепції «водного сліду» (water footprint) для гірничодобувної галузі з метою врахування не лише кількісного, а й якісного впливу на ресурси [11]. Це особливо актуально для регіонів із дефіцитом води або з інтенсивною експлуатацією підземних вод.

Окремі українські дослідження, зокрема роботи Гаврилюк та ін., вказують на істотний вплив гранітних кар'єрів на підземні та поверхневі води у межах Українського щита [12]. У дослідженні [13] відзначають зміну гідрохімічного фону у річці Тетерів у результаті господарської діяльності у прилеглих до водозбору районах.

Таким чином, наукова спільнота визнає важливість комплексного підходу до вивчення як кількісних, так і якісних змін у водному середовищі, зумовлених впливом гірничодобувної промисловості, а також потребу в інструментах ранньої ідентифікації потенційних джерел забруднення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна. Встановлення причинно-наслідкових зв'язків між скидами шахтно-кар'єрних вод та змінами у якості річкових вод є складним завданням, оскільки ці процеси залежать від численних взаємопов'язаних факторів. У цьому контексті особливого значення набуває застосування кореляційного аналізу для виявлення залежностей між окремими гідрохімічними показниками води, що дозволяє краще зрозуміти характер антропогенного впливу та обґрунтувати природоохоронні заходи. Проблема полягає у відсутності достатньої кількості комплексних досліджень, які б базувалися на кількісній оцінці взаємозв'язків між показниками складу кар'єрних вод і якістю води річок у зоні діяльності гірничодобувних підприємств.

Методологічне або загальнонаукове значення. У межах дослідження було здійснено аналіз гідрохімічного складу кар'єрних вод, що формуються в результаті виробничої діяльності ПрАТ «Транснаціональної корпорації «Граніт» та скидаються у річку Уж. Моніторинг охоплював період 2021–2023 років, протягом якого систематично відбиралися проби кар'єрних вод у двох точках: за 500 м вище та нижче умовної точки скиду. Визначалися такі показники: рН, амонійний азот, нітрити, нітрати, загальне залізо, фосфати, хімічне споживання кисню (ХСК), хлориди, сульфати, завислі речовини, нафтопродукти, сухий залишок і біохімічне споживання кисню за 5 діб (БСК₅).

Виклад основного матеріалу. У результаті досліджень було встановлено, що найбільші коливання спостерігалися за вмістом азоту амонійного, нітритів, заліза загального, фосфатів і БСК₅. У декількох випадках концентрації нітритів, амонійного азоту та заліза перевищували гранично допустимі значення, встановлені для водойм господарсько-побутового призначення.

Зокрема, вміст загального заліза протягом всього періоду дослідження перевищував гранично допустимий скид (0,1 мг/дм³) у 3–4 рази як у точці вище, так і нижче скиду. Вміст амонійного азоту перевищував норматив у окремі періоди майже вдвічі. Концентрації фосфатів залишалися в межах допустимих значень (ГДС = 0,7 мг/дм³), проте їх динаміка вказує на нестабільність навантаження з боку виробництва.

Для поглибленої інтерпретації результатів було побудовано кореляційну матрицю, на основі якої можна проаналізувати взаємозв'язки між гідрохімічними показниками (рис. 1).

На основі наданої кореляційної матриці можна проаналізувати взаємозв'язки між гідрохімічними показниками. Оцінювання коефіцієнтів Пірсона (від -1 до +1) дозволяє визначити ступінь і напрямок кореляції. Кореляційний аналіз дозволив виділити сильні позитивні кореляції (рис. 2), сильні нега-

тивні кореляції (рис. 3), помірні кореляції (табл. 1) та слабкі або відсутні кореляції (табл. 1).

Аналіз кореляційних зв'язків між основними гідрохімічними показниками кар'єрних вод свідчить про наявність статистично значущих взаємозалежностей, які дозволяють зробити висновки щодо джерел та типів забруднення.

Найвищу кореляцію виявлено між хімічним споживанням кисню (ХСК) та сульфатами ($r = 0,94$), що вказує на ймовірну спільність джерел органічного та сірчаного забруднення, зокрема на побутові чи технологічні стоки. Сильний позитивний зв'язок між азотом амонійним і ХСК ($r = 0,85$) свідчить про домінування органічного забруднення антропогенного походження, зокрема продуктів азотовмісного розкладу. Кореляція між азотом амонійним та сульфатами ($r = 0,82$) також підтримує припущення щодо участі побутових стоків або інфільтрату з розроблених територій як основного джерела навантаження. Хлориди та сухий залишок мають тісний зв'язок ($r = 0,86$), що є характерною ознакою мінералізації водного середовища, яка, ймовірно, обумовлена фоновим геохімічним складом порід та можливим додатковим внеском з техногенних джерел. Висока кореляція між фосфатами та ХСК ($r = 0,76$) свідчить про супровід органічного забруднення сполуками фосфору, які часто надходять у воду з мийними засо-

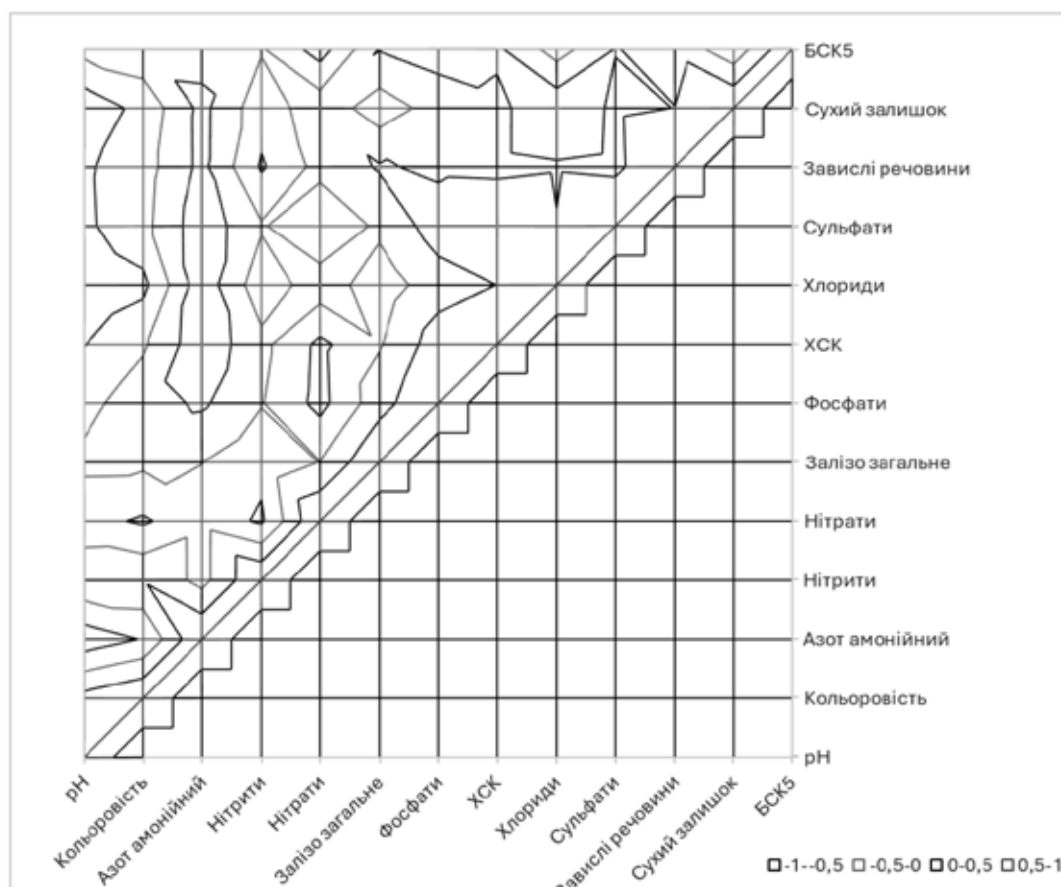
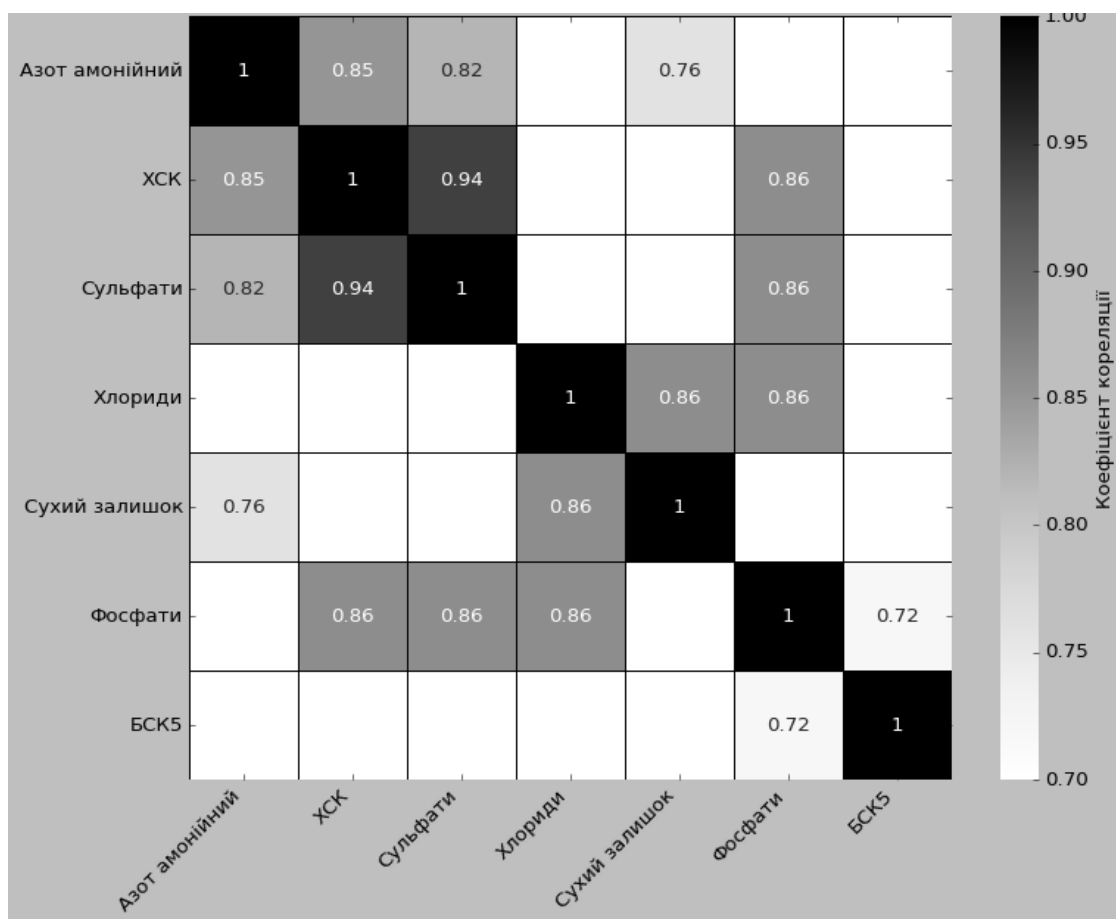
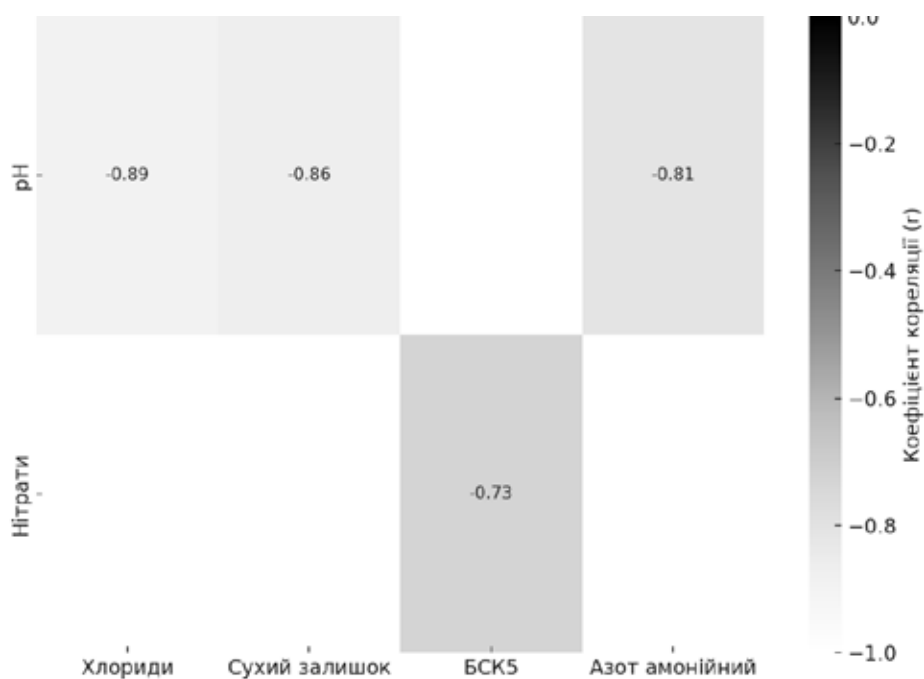


Рис. 1. Кореляційна матриця показників складу кар'єрних вод

Рис. 2. Сильні позитивні кореляції ($r > 0,7$)Рис. 3. Сильні негативні кореляції ($r < -0,7$)

бами або агрохімікатами. Зв'язок між БСК₅ і фосфатами ($r = 0,72$) підтверджує наявність біогенного навантаження, що активує біохімічне споживання кисню в процесі мінералізації речовин (рис. 2).

Негативна кореляція між рН і хлоридами ($r = -0,89$) вказує на підвищення кислотності води за умов зростання солевого навантаження, зокрема надходження хлоридів. Така залежність може бути пов'язана зі скидами високомінералізованих вод або інфільтрацією з ділянок накопичення техногенних відходів. Тісний зворотний зв'язок між рН і сухим залишком ($r = -0,86$) підтверджує, що зростання мінералізації супроводжується зниженням лужності середовища, що може вказувати на накопичення мінеральних компонентів, які спричиняють кислотну реакцію. Кореляція між нітратами та БСК₅ ($r = -0,73$) вказує на зворотну залежність між кінцевими продуктами окиснення азотовмісних сполук і активністю біохімічних процесів, зокрема споживанням кисню. Це може свідчити про те, що при значному вмісті нітратів органічна речовина вже трансформована до стабільних неорганічних форм. Нарешті, сильний негативний зв'язок між рН та азотом амонійним ($r = -0,81$) свідчить про підкислення середовища внаслідок надходження амонійних форм азоту, які можуть походити з господарсько-побутових або фільтраційних стоків (рис. 3).

Виявлено декілька пар показників, що демонструють середню силу позитивної кореляції ($r = 0,51-0,64$), що свідчить про потенційну спільність джерел забруднення або узгодженість фізико-хімічних процесів у водному середовищі. Зокрема, помірну позитивну кореляцію виявлено між азотом амонійним і сухим залишком ($r = 0,64$), що вказує на внесок азотовмісних сполук у загальну мінералізацію води. Така залежність є типовою для вод, які зазнають впливу господарсько-побутових стоків, а також фільтратів із зон техногенного впливу. Інша важлива пара – БСК₅ і ХСК ($r = 0,59$) – демонструє узгоджене органічне забруднення, що підтвер-

джує активну участь органічних речовин у процесах хімічного та біохімічного окиснення у воді. Така комбінація часто є індикатором забруднення органікою біогенного походження (побутові або аграрні стоки). Зв'язок БСК₅ і сульфатів ($r = 0,51$) свідчить про можливу присутність забруднень побутового або тваринницького походження, де сульфати можуть утворюватися внаслідок розкладання органіки або використання миючих засобів і дезінфектантів. Також встановлено помірний зв'язок між загальним залізом і БСК₅ ($r = 0,52$), що дозволяє припустити можливу участь колоїдного або органічно зв'язаного заліза у складі води. Такий тип зв'язку характерний для вод, забруднених розчинними формами металів, які взаємодіють з органікою (табл. 1).

У межах дослідження також проаналізовано пари показників, які не продемонстрували суттєвого кореляційного зв'язку ($r \approx 0$). Такі результати свідчать про незалежність змін у концентраціях відповідних компонентів або про відмінну природу їх походження та міграційної поведінки у водному середовищі. Зокрема, між загальним залізом і ХСК коефіцієнт кореляції становить $r = -0,047$, що фактично свідчить про відсутність взаємозв'язку між вмістом заліза та рівнем хімічного споживання кисню. Такий результат може вказувати на незалежну поведінку заліза, яке, ймовірно, присутнє у воді в неорганічній або колоїдній формі, не пов'язаній із органічними домішками. Аналогічно, між загальним залізом і нітратами спостерігається практично нульова кореляція ($r = 0,011$), що свідчить про відсутність окислювальної взаємодії між цими компонентами у досліджених умовах. Це може бути результатом різних механізмів надходження: нітрати формуються внаслідок нітрифікації, тоді як залізо може надходити з ґрунтових порід у формі нерозчинних оксидів або гідроксидів (табл. 2).

Такі результати свідчать про складну і неоднорідну структуру джерел забруднення, яка може включати як органічні, так і мінеральні компоненти,

Таблиця 1

Помірні кореляції ($r = 0,5-0,7$)

Параметри	Коефіцієнт, r	Інтерпретація
Азот амонійний – Сухий залишок	0,64	Внесок у загальну мінералізацію
БСК ₅ – ХСК	0,59	Узгоджене органічне забруднення
БСК ₅ – Сульфати	0,51	Ймовірно побутове або тваринницьке походження
Залізо – БСК ₅	0,52	Можлива участь колоїдного заліза в органічному комплексі

Таблиця 2

Слабкі або відсутні кореляції (r близько 0)

Параметри	Коефіцієнт, r	Інтерпретація
Залізо – ХСК	-0,047	Показує незалежність загального заліза від органічного навантаження
Залізо – Нітрати	0,011	Окислювальна форма заліза не пов'язана із нітратами

що діють незалежно один від одного у гідросистемі. Залізо, зокрема, може надходити з мінеральної основи кар'єру, а не з органічного навантаження, притаманного господарським або аграрним стокам.

Висновки. Отримані результати засвідчують складну структуру забруднення та неоднорідність джерел впливу, що поєднує як побутові, аграрні, так і геохімічно обумовлені чинники. Проведений аналіз демонструє ефективність використання кореляцій-

но-статистичних методів як інструменту екологічного моніторингу та оцінки впливу гірничодобувної діяльності на водні екосистеми.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропонований підхід може бути використаний для оптимізації управлінських рішень, розробки природоохоронних заходів та підтримки сталого водокористування в регіонах із підвищеним техногенним навантаженням.

Література

1. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2022. Article ID 4296872. <https://doi.org/10.1155/2022/4296872>.
2. Vavrková M. D., Winkler J., Adamcová D., Kotovicová, J. Environmental assessment of heavy metal pollution in industrial and mining areas: A case study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, No. 2. P. 1566–1576. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11079-1>.
3. Younger P. L. Mine water pollution: The remarkable recovery of the River Tyne. *Science of the Total Environment*. 2002. Vol. 265, No. 1–3. P. 185–208. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00675-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00675-4).
4. Tutu H., McCarthy T. S., Cukrowska E. The chemical characteristics of acid mine drainage with particular reference to sources, distribution and remediation: The Witwatersrand Basin, South Africa as a case study. *Applied Geochemistry*. 2011. Vol. 26, No. 12. P. 2364–2374. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.002>.
5. Khorashadi Zadeh Z., Soleimani M., Rezaei H., Ghomi M. Application of cluster and principal component analyses in the evaluation of water quality of rivers. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. Vol. 193, No. 2. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08859-6>.
6. Fashola M. O., Ngole-Jeme V. M., Babalola O. O. Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016. Vol. 13, No. 11. Article 1047. <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>.
7. 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>.
8. Nunoo S., Manu J., Owusu-Akyaw FKB, Nyame FK. Impact of artisanal small-scale (gold and diamond) mining activities on the Offin, Oda and Pra rivers in Southern Ghana, West Africa: A scientific response to public concern. *Heliyon*. 2022. Vol. 8, No. 12. Article e12323. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12323.
9. Zhang L., Xu Z., Sun Y., Gao Y., Zhu L. Coal Mining Activities Driving the Changes in Microbial Community and Hydrochemical Characteristics of Underground Mine Water. *Int J Environ Res Public Health*. 2022. Vol. 19, No. 20. Article 13359. doi: 10.3390/ijerph192013359.
10. Ayiwouo M. N., Yamgouot F. N., Ngueyep Mambou L. L., Kingni S. T., Ngounouno I. Impact of gold mining on the water quality of the lom river, Gankombol, Cameroon. *Heliyon*. 2022. Vol. 8, No. 12. Article e12452. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12452.
11. Northey S. A., Mudd G. M., Werner T. T., Jowitt S. M., Haque N., Yellishetty M., Weng Z. Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 135. P. 1098–1116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.024>.
12. Гаврилюк Р. Б., Логвиненко О. І., Негода Ю. О. Оцінка впливу розробки кар'єрів на підземні води в межах Українського щита в контексті оцінки впливу на довкілля (на прикладі Вирівського гранітного кар'єру). *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2024. Том 17, Вип. 1. С. 93–108. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.308419>.
13. Валерко Р. А., Бондарчук В. М., Кірейцева Г. В. Гідрохімічний моніторинг річки Тетерів у межах питного водозабору міста Житомир. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2025. № 7. С. 3-11. <https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-01>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: