

УДК 550.42:621.039

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.07>

Петро ПІГУЛЕВСЬКИЙ¹, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-6163-4486
e-mail: pigulev@ua.fm

Михайло ДОВБНИЧ², д-р геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-9167-4630
e-mail: dovbnichm@gmail.com

Олег ТЯПКІН², д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-2345-8343
e-mail: tiapkin.oleh@gmail.com

Ольга МЕДВЕДЕВА³, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-5575-713X
e-mail: medvedevaolga1702@gmail.com

Лариса АНІСИМОВА³, канд. біол. наук
ORCID ID: 0000-0003-3398-5400
e-mail: lanisimova@gmail.com

¹Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

²Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

³Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

КУМУЛЯТИВНИЙ ВПЛИВ ГІРНИЧОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА НА ГІДРОГЕОХІМІЧНИЙ СТАН ТЕРИТОРІЇ (НА ПРИКЛАДІ ПІВДЕННОГО КРИВБАСУ)

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)

Вступ. Південний Кривбас є однією з найбільш промислово навантажених територій південного сходу України. Техногенні зміни навколишнього середовища стають незворотними, що впливає на довкілля, особливо на ґрунти. У представлених дослідженнях виконано узагальнювальний аналіз рухливості основних хімічних елементів, що додатково забруднюють територію, прилеглу до гірничодобувних підприємств, унаслідок сільськогосподарської діяльності та визначення ступеня впливу міграції відповідних хімічних елементів на геохімічний стан ґрунтів, поверхневих і підземних вод.

Методи. Для визначення ступеня та характеру техногенних змін у геоекологічному стані півдня Кривбасу застосовано методику порівняльно-статистичного аналізу узагальнення результатів попередніх гідрогеохімічних досліджень впливу гірничої промисловості та сільського господарства на основні компоненти довкілля.

Результати. У результаті спільної дії факторів промислової та сільськогосподарської діяльності за тривалий час сформувалися нові стійкі природно-техногенні геосистеми. Основними забруднювачами ґрунту, підземних і поверхневих вод та донних відкладень у гірничодобувних регіонах є відходи гірничодобувної промисловості та сільськогосподарські добрива. Порівняння основних забруднювачів, які є результатом гірничодобувної та сільськогосподарської діяльності, показує, що забруднювальні компоненти значною мірою однакові. Це зокрема призводить до необґрунтованого перебільшення результатів гірничодобувної діяльності в загальному забрудненні прилеглих сільськогосподарських територій. Показано, що для розмежування небезпечного впливу (внеску) гірничодобувної промисловості та аграрного комплексу в забруднення території окремого регіону недостатньо виключно традиційних геохімічних даних. Необхідно додаткове просторово-часове (моніторингове) геолого-геофізичне дослідження як джерел, так і шляхів поширення окремих видів забруднення. Водночас визначальну роль в оцінці геоекологічного стану території досліджень мають структурно-тектонічні особливості, для параметризації яких потрібно використання відомих уявлень про системи докембрійських розломів, встановлених за комплексом геолого-геофізичних даних.

Висновки. Зроблено висновки про значний вплив міграції окремих хімічних елементів на геохімічний стан ґрунтів, поверхневих і підземних вод на прилеглих до гірничодобувних підприємств сільськогосподарських територіях. Наявність просторово-глибинної геолого-геофізичної інформації про особливості тектонічної (розломно-блокової) будови є однією з основ для розробки методики розмежування елементів небезпечного впливу гірничої промисловості та аграрного комплексу у формуванні загального геоекологічного стану конкретного регіону.

Ключові слова: відходи гірничодобувної промисловості, геолого-геофізична інформація, гідрогеохімія, добрива, рухомі форми хімічних елементів, розломи земної кори, тектонічна будова, хімічне забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод.

Вступ

Нині в Україні розробляється понад 50 % наявних запасів так званих бідних залізних руд. Багаті руди, які становлять понад 43 % усіх розвіданих запасів руд, можуть використовуватися в металургії без збагачення, оскільки середній вміст заліза в них сягає 57,6 %. Але їх розробка – це лише ~40 % всього видобутку і не забезпечує потреби вітчизняної металургії, що зумовило розробку бідних руд залізистих кварцитів Криворізького залізорудного басейну (Кривбасу), які легко збагачуються. Тут розробку залізорудних родовищ здійснюють гірничозбагачувальні комбінати (ГЗК) як відкритим, так і підземним способами. Особливістю цих ГЗК є те, що вони

розташовані на території м. Кривий Ріг, де відсутні вільні ділянки землі для додаткового складування відходів збагачення (Багрій, Блінов, & Белокопитова, 2002; Багрій, Гожик, & Самоткал, 2005; Довгий, Коржнев, & Трофимчук, 2017; Довгий та ін., 2021). Особливо негативний вплив на довкілля тут чинять саме підприємства з видобутку та збагачення залізної руди, де більша частина видобутої сировини перетворюється на накопичувальні та забруднювальні відходи. На земельній ділянці площею понад 5 тис. га зосереджено понад 3 млрд м³ гірничої маси. Відвали та сховища відходів збагачення, крім виведення з господарського обороту величезних земельних площ, створюють довготривалий негативний вплив

© Пігулевський Петро, Довбніч Михайло, Тяпкін Олег, Медведєва Ольга, Анісімова Лариса, 2025

на довкілля. Частково розв'язанню цих проблем сприяють рекультивація відвалів і сховищ відходів збагачення та утилізація відходів гірничого виробництва, які проводяться поки що в недостатніх масштабах (Рудько, & Яковлев, 2018; Коржнев, & Малахов, 2012; Шапар, Скрипник, & Міхеєв, 2018). У той же час гірничодобувні підприємства часто межують із сільськогосподарськими угіддями, де внаслідок внесення добрив і обробки рослин пестицидами у ґрунт потрапляють хімічні елементи різного ступеня небезпеки. Таким чином, в умовах Центральної та Південно-Східної України основними забруднювачами ґрунтів та підземних і поверхневих вод є не тільки відходи гірничодобувної промисловості, а й засоби хімізації сільського господарства (добрива, пестициди). Техногенні зміни навколишнього середовища особливо незворотними. Компоненти довкілля, особливо ґрунти, втрачають здатність до природного самовідновлення. Унаслідок спільної дії факторів промислової (насамперед гірничодобувної) та сільськогосподарської діяльності за тривалий час сформувалися нові стійкі природно-техногенні геосистеми. У цих системах найбільш уразливими елементами є саме поверхневі та підземні води, а також зона аерації. Проте слід зазначити, що у зв'язку із загальним спадом промислового виробництва в Україні за останні десятиліття відбулося відповідне значне зменшення кількості забруднювальних стічних вод. У контексті цього зменшення негативного впливу на довкілля гірничодобувної промисловості актуальним стає питання розробки методики виділення впливу (зростаючої частки/внеску) сільськогосподарського комплексу в сумарне забруднення окремої території. Для вирішення цього геоecологічного питання недостатньо залучення традиційних геохімічних даних. Необхідна розробка локальних систем геоecологічного моніторингу гірничодобувних підприємств з прилеглими сільськогосподарськими землями – як інформаційної системи підтримки необхідних управлінських рішень щодо раціонального природокористування в умовах наявності як промислових, так і сільськогосподарських джерел забруднення основних компонентів довкілля. У рамках цієї проблеми набуває значення просторово-часове геолого-геофізичне

дослідження не тільки самих джерел, а й шляхів поширення окремих видів забруднення, у т. ч. з урахуванням структурно-тектонічних особливостей територій. На прикладі Південного Кривбасу розглянемо деякі аспекти вирішення цих питань.

Методи

Для визначення ступеня та характеру техногенних змін у геоecологічному стані півдня Кривбасу застосовано методику порівняльно-статистичного аналізу раніше отриманих результатів гідрогеохімічних досліджень впливу гірничої промисловості та сільського господарства на основні компоненти довкілля. Як вихідні дані використано результати відповідних досліджень із відкритих літературних джерел та результати детальних геохімічних і гідрохімічних досліджень території Південного Кривбасу 2010–2019 рр.

Теоретична частина. Основні забруднювальні та токсичні елементи, що надходять у прилеглі ґрунти гірничих (залізрудних) підприємств (Губіна, & Горлицький, 2010; Anisimova L., Babyi K., & Pihulevskyi, 2022), наведено в табл. 1. Зокрема постійними домішками (у незначних кількостях) у залізистих кварцитах і багатих залізних рудах Кривбасу є фосфор та сірка. Постійними супутніми мікроелементами є Cr (4,7–78,7 мг/кг), Mn (1,9–198,34 мг/кг) і Ge (0,2–9,0 мг/кг), а також Cu, Zn і Ni.

Оскільки гірничодобувні підприємства Кривбасу межують із сільськогосподарськими угіддями, то при внесенні добрив і засобів захисту рослин у ґрунт потрапляють хімічні елементи різного ступеня небезпеки. Вони мігрують у підземні водонаосні горизонти (переважно перший безнапірний), а потім у поверхневі води, що призводить до їх забруднення. При цьому внаслідок змиву шкідливих компонентів із водозбірної площі забруднювальні речовини можуть потрапляти безпосередньо у поверхневі води. Узагальнені дані про основні забруднювачі територій агропромислового комплексу наведено в табл. 1. Агропромисловий комплекс може значно збільшити техногенне навантаження на території поблизу гірничодобувних підприємств. Узагальнену інформацію про сільськогосподарські джерела забруднення ґрунтів (International..., 1992) наведено в табл. 2.

Таблиця 1

Основні забруднювальні елементи територій унаслідок виробничої діяльності гірничодобувної промисловості та агропромислового комплексу – однакові елементи-забруднювачі (зелені), різні – (жовті)

Комплекси	Основні забруднювачі										
гірничодобувний	P	Mn	Cu	Cr	Pb	Zn	Co	Ge	Ni	Ti	Sn
агропромисловий	P	Mn	Cu	Cr	Pb	Zn	Cd	As	F	Hg	Sr

Таблиця 2

Узагальнена інформація щодо сільськогосподарських джерел забруднення ґрунтів

Хімічний елемент	Шляхи надходження, мг/кг					
	при поливі стічними водами підприємств	з фосфорними добривами	з вапняком	з азотними добривами	з органічними добривами	з пестицидами
As	2–26	2,0–1200	0,1–24,0	2,2–120	3–25	22–60
Cd	2–1500	0,1–170	0,04–0,1	0,05–8,5	0,3–0,8	-
Co	2–260	1–12	0,4–3,0	5,4–12	0,3–24	-
Cr	20–4060	66–245	10–15	3,2–19	25,2–55	-
Cu	50–3300	1–300	2–125	1–15	2–60	15–50
F	2–7	850–3800	300–740	-	-	18–45
Hg	0,1–55	0,01–1,2	0,05	0,3–2,9	0,09–0,2	0,8–42
Mn	60–3900	40–2000	40–1200	-	30–550	-
Mo	1–40	0,1–60	0,1–15	1–7	0,05–3	-
Ni	16–5300	7–38	10–20	7–34	7,8–30	-
Se	2–9	0,5–25	0,08–0,1	-	2,4	-
Pb	50–3000	7–225	20–1250	2–27	6,6–15	60
Sn	40–700	3–19	0,5–4	1,4–16	3,8	-
Zn	700–4900	50–1450	10–450	1–42	15–250	1,3–25

Порівнюючи основні забруднювачі, що є результатом гірничодобувної та сільськогосподарської діяльності (табл. 1), можна побачити, що забруднювальні компоненти значною мірою однакові. Це іноді призводить до необґрунтованого перебільшення результатів гірничодобувної діяльності в загальному забрудненні прилеглих сільськогосподарських територій. Тому в умовах техногенно навантажених територій, насичених гірничодобувними, промисловими та сільськогосподарськими комплексами, транспортними мережами та накопиченими промисловими і побутовими відходами, актуальним є виявлення джерел і шляхів міграції токсичних речовин і важких металів, у тому числі і в ґрунтовий покрив (Menshov, & Sukhorada, 2012; Tonkha et al., 2020).

Результати

Південний Кривбас є однією з найбільш технічно навантажених територій південного сходу України (див. рис. 1). За попередніми результатами геохімічних досліджень протягом 2010–2019 рр. вміст P, Pb, Zn, Co, Ni, Cu, Cr, V, Mn у чорноземному ґрунті цього регіону практично не змінюється (Pihulevskiy et al., 2019; Рудько, & Яковлев, 2018). Низькі значення вмісту рухомих форм хімічних елементів, а також стабільність їх загального

вмісту в ґрунті може свідчити про наближення до повної насиченості ґрунтів цими елементами. Валовий вміст перелічених хімічних елементів на цій території як на об'єктах гірничодобувних підприємств (у т. ч. хвостосховищ і відвалів), так і на значній відстані від них, мають однакові межі зміни вмісту цих елементів. Це свідчить про спільне забруднення цієї території гірничодобувним та агропромисловим комплексами. Останнє збільшує техногенне навантаження, оскільки лише 30–60 % добрив, що вносяться в ґрунт, використовуються рослинами, а 40–70 % з них потрапляють у навколишнє середовище, збільшуючи його забруднення. Водночас 20–30 % цих речовин залишається в ґрунті, у тому числі 10–15 % зв'язується ґрунтовою вологою, а 28–40 % – у газоподібному стані потрапляє із ґрунту в поверхневі шари атмосфери. Від випаровування вологого ґрунту об'ємом 100 м³ втрачається до 23,3 кг азоту (або 30 кг NH₃), внесеного на поля з мінеральними добривами. З полів на прилеглі території виноситься близько 1,8 % мінеральних добрив. При зрошенні схилів земель у водойми з них вимивається до 20 % азоту, 2–5 % фосфору і 10–17 % калію із внесеної кількості мінеральних добрив.

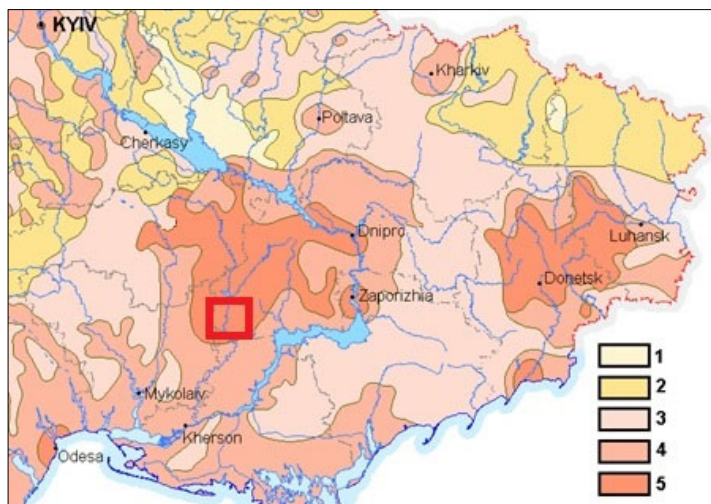


Рис. 1. Положення Південного Кривбасу (червоний контур) на карті екологічної ситуації Південного Сходу України (електронна версія Атласу України, Інститут географії НАН України, 1999–2000).

Умови життя населення: 1 – сприятливі, 2 – помірно сприятливі, 3 – задовільні, 4 – погіршені, 5 – важкі

наближення до повного насичення хімічними елементами ґрунту призводить до того, що нова порція шкідливих елементів, отримана з неоптимально внесеними добривами, може вільно мігрувати в перший водоносний горизонт і внаслідок змиву з водозбірної площі з часом потрапляти в поверхневі водотоки. Так, на території дослідження елементи (P, Pb, Zn, Co, Ni, Cu, Cr, V та Mn) із "хвостосховищ" великих гірничодобувних підприємств Південного Кривбасу (ПАТ "Південний ГЗК" та ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг") можуть мігрувати до р. Інгулець, що поєднується із забрудненням агропромислового комплексу. Це підтверджується відсутністю змін у вмісті елементів P, Cr, Mn та Cu (які є "звичайними" забруднювачами гірничодобувного та агропромислового комплексів) у цій річці вище та нижче від потенційного скиду із цих хвостосховищ. На фоні зниження мінералізації води загалом по річці Інгулець з початку 2000 р. фіксуються рівні межі зміни мінералізації цієї річки вище і нижче від потенційного скиду води з хвостосховищ великих гірничодобувних підприємств Південного Кривбасу (див. рис. 2).

У контексті досліджень викликають зацікавленість результати спектрального аналізу донних відкладів р. Інгулець та р. Саксагань. Тут виокремлено групу пріоритетних елементів-забруднювачів: I класу небезпеки (Pb, Zn, Be, P, As, Se), II класу (Cr, Cu, Mo, Ni, Co, Bi, Li), та II класу (V, Mn) (Багрий та ін., 2005). Особливий інтерес становлять результати дослідження варіацій вмісту миш'яку, який поширений у басейні р. Інгулець. Цей хімічний елемент не належить до основних забруднювачів гірничодобувної промисловості – основним джерелом його надходження є добрива, що вносяться в ґрунт протягом вегетаційного періоду. Про це свідчить перевищення його вмісту (2,7–3,5 ГДК) у літній вегетаційний період на відміну від зимового, а також перевищення ГДК у донних відкладеннях за вмістом миш'яку в р. Бокова (7,5 ГДК, с. Валове,) та р. Боковенька (6,5 ГДК, с. Великофедірівка). Особливо слід підкреслити, те що вважається – ці поселення перебувають поза зоною значного впливу гірничодобувної промисловості. У р. Інгулець у районі с. Латівка зафіксовано 4-кратне перевищення ГДК за вмістом миш'яку в донних

відкладах та перевищення його фонових значень за вмістом Zn, Mo та Bi відповідно – у 2,9, 2,2 та 2,0 раза. Також слід відзначити, що молібден (який не зустрічається в асоціації із залізною рудою), як і миш'як, є повсюдним у донних відкладеннях усього річкового басейну із 5-кратним перевищенням своїх фонових значень. Його надходження в ґрунт з фосфорними добривами становить 0,1–60 мг/кг сухого ґрунту, з азотними добривами – 1–7 мг/кг сухого ґрунту, з вапняковими – 0,1–15 мг/кг сухого ґрунту. Усе це може свідчити на користь значного забруднення поверхневих вод саме через діяльність агропромислового комплексу.

Коефіцієнти кореляції між вмістом хімічних елементів у ґрунті не мають певного позитивного чи негативного сталого зв'язку (табл. 3). Вміст Si в ґрунті пов'язаний з V, джерелом якого у ґрунті є гірські породи залізородних родовищ, що підтверджується наявністю його "генетичного" зв'язку з Mn, Ni та відсутністю такого зв'язку з P, Zn, Cu, Pb. Джерелом Mn також є переважно гірські породи залізородних родовищ, що підтверджується наявністю зв'язку з Cr, V, Ni та Fe. Те саме стосується і вмісту Ni в ґрунті, зумовленому в основному його внесенням з родовищ залізної руди. Це підтверджується наявністю генетичного зв'язку між Ni і Cr, Fe, Mn, V і відсутністю такого зв'язку з Zn, Pb, Cu і P.

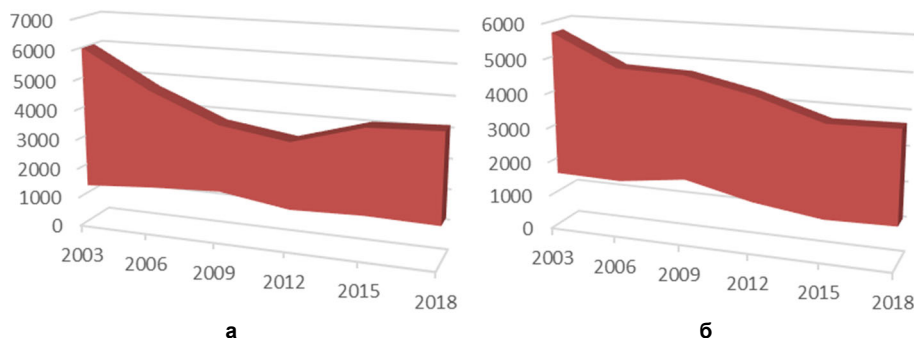


Рис. 2. Зміна мінералізації в р. Інгулець (у мг/дм³) вище (а) та нижче (б) від потенційного скиду води із хвостосховищ великих гірничодобувних підприємств Південного Кривбасу (за даними ПАТ "Південний ГЗК" та ПАТ "АрселорМіттал Кривий Пір")

Таблиця 3

Коефіцієнти кореляції між валовими формами вмісту хімічних елементів у ґрунті Південного Кривбасу (вихідні дані ПАТ "Південний ГЗК" та ПАТ "АрселорМіттал Кривий Пір")

	Si	P	V	Cr	Mn	Fe _{зв}	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
S	1	-0,17	0,24	-0,18	-0,55	-0,47	0,02	0,02	0,03	-0,16	-0,10
P	-0,17	1	-0,33	-0,06	-0,07	-0,28	0,07	-0,52	0,39	0,04	0,09
V	0,24	-0,33	1	0,20	0,31	-0,04	0,22	0,49	-0,44	-0,44	-0,52
Cr	-0,18	-0,06	0,20	1	0,16	0,11	-0,16	0,24	-0,09	0,07	0,11
Mn	-0,55	-0,07	0,31	0,16	1	0,58	-0,13	0,46	-0,28	-0,27	-0,22
Fe ₂ O ₃	-0,47	-0,28	-0,04	0,11	0,58	1	-0,09	0,29	-0,15	0,18	0,24
Co	0,02	0,07	0,22	-0,16	-0,13	-0,09	1	0,07	0,32	0,17	-0,06
Ni	0,02	-0,52	0,49	0,24	0,46	0,29	0,07	1	-0,48	-0,09	-0,17
Cu	0,03	0,39	-0,44	-0,09	-0,28	-0,15	0,32	-0,48	1	0,28	0,31
Zn	-0,16	0,04	-0,44	0,07	-0,27	0,18	0,17	-0,09	0,28	1	0,87
Pb	-0,10	0,09	-0,52	0,11	-0,22	0,24	-0,06	-0,17	0,31	0,87	1

У той же час Cr переважно "асоціюється" з родовищами залізної руди та частково з добривами, про що свідчить його зв'язок з Mn, V, Ni та, частково, з Pb, а також відсутність асоціації з Co та Si. Також слід зазначити, що Fe має зв'язок із Zn, Pb, Ni, Mn через його можливе надходження в ґрунт із гірських порід залізородних родовищ та з добривами. У разі постійного запылення залізородних відвалів залізо "розтікається" по площі майже рівномірно. Добрива також повинні рівномірно розподілятися і вноситися у ґрунт. Під впливом опадів відбувається такий самий розподіл Fe по площі досліджуваної території, що зумовило властивий зв'язок Fe з Pb і Zn. До цього слід додати, що джерелами Co в ґрунті, як і Fe, можуть бути як залізородні родовища, так і добрива, що підтверджується наявністю генетичної спорідненості з Zn, V і Cu.

Із удобренням ґрунту переважно пов'язані: фосфор (який має зв'язок із Pb, Cu та не має зв'язку з Fe, V та Ni), мідь (яка має зв'язок з Zn, Pb, Co, P і не має зв'язку з Fe, Mn, V, Ni), цинк (який має зв'язок з Co, Fe, Cu, Pb і не має зв'язку з Mn і V) та свинець (який має зв'язок з Fe, Cu і Zn та не має зв'язку з Ni, Mn та V).

Отже, джерелами надходження в ґрунт Si, V, Cr, Mn і Ni є переважно гірські породи залізородних родовищ, а P, Cu, Zn і Pb – добрива. Fe і Co мають подвійну природу надходження в ґрунт. На підставі інформації про вміст хімічних елементів у поточних і накопичених (лежачих) відходах елементів їх міграційну здатність із хвостосховищ до підземних вод. Кількість Mn та Cu у лежачих відходах зменшилась у разі порівняно з поточними відходами збагачення. Ці елементи з відходів гірничого виробництва не можуть суттєво впливати на забруднення значних агропромислових територій, враховуючи їх високу міграційну здатність. Тому слід вважати, що основним джерелом забруднення цими елементами цих територій є внесені в ґрунт добрива. Такі елементи, як Co, Pb, Zn і Ag, із сухих поверхонь хвостосховищ можуть потрапляти в ґрунт разом із пилом.

Сильній фіксації миш'яку при адсорбції частинками гідроксидів заліза перешкоджає конкуренція з боку інших оксоаніонів: P₃O₄, S₂O₄, Mo₂O₄ (Manning, & Goldberg, 1996; Jackson, & Miller, 2000). Тому у "фосфатованих" водах можна очікувати зниження "ефективності бар'єру" доти, поки миш'як не буде зафіксовано. Органічні

сполуки збільшують біодоступність миш'яку. Дослідження, проведені на гетиті -FeOOH, показали, що адсорбція миш'яку знижується в присутності гумінових і фульвокислот (Grafe, Eick, & Grossel, 2001). На адсорбцію впливають тип, щільність і кислотні функції органічних полімерів. Крім того, органічні молекули перешкоджають електростатичній взаємодії As (V) з поверхнею гетиту. Конкуренція органічних лігандів залежить від pH середовища. Водночас основним елементом, який міститься в ґрунті, є кремній. Чим більше силікатів, тим менше органічних речовин у ґрунті.

Наведені результати свідчать про те, що для розмежування небезпечного впливу (внеску) гірничодобувної промисловості та аграрного комплексу в забруднення території окремого регіону недостатньо виключно геохімічних даних. Необхідно додаткове просторово-часове вивчення як джерел, так і шляхів поширення окремих видів забруднення. Останнє є складною науково-прикладною проблемою, розв'язання якої вимагає розвитку як традиційних, так і нетрадиційних технологій діагностики як стану екосистем, так і динаміки антропогенного впливу на довкілля. Технології досліджень, що використовують комплекс геофізичних методів, дають змогу оперативніше визначати їх стан і функціонування за малою кількістю параметрів. Перспективи ефективного застосування геофізичної інформації при розв'язанні складних геоекологічних задач визначаються передусім різноманітністю фізичних полів, що об'єктивно відбивають статистичну та динамічну природного середовища (будь-які просторово-часові зміни довкілля викликають появу аномалій геофізичних полів, що реагують або пов'язані з екологічним станом конкретної території через геолого-петрографічні, водно-фізичні, геохімічні, біологічні та інші характеристики) (Тяпкін, 2006).

Наявний позитивний досвід досліджень небезпечного геоекологічного впливу об'єктів гірничого виробництва на території Південного Кривбасу (де в результаті взаємодії природних геодинамічних і техногенних процесів відзначається високий рівень активізації небезпечних (Pigulevskiy, & Svystun, 2021) геоекологічних і насамперед гідрогеоекологічних процесів) з використанням комплексу геофізичних методів: граві-магніторозвідки, електророзвідки методом вертикального електричного зондування, а також дешифрування аеро- і космоснімків (Pigulevskiy et al., 2016; Пігулевський, Тяпкін, & Свистун, 2018; Ivanik, Shevchuk, & Tustanovska, 2020). За результатами проведених комплексних геолого-геофізичних досліджень, що супроводжувалися геолого-гідрогеологічними спостереженнями та бурінням завірювальних свердловин, отримано геолого-геофізичні розрізи та результативні карти, зміни геоелектричних параметрів, побудовані 3D-моделі зміни геоелектричних параметрів по латералі і глибині. Зокрема визначено, що зміни значень уявного опору геологічного розрізу проходять не рівномірно і не тільки по площі, але й по глибині, що у свою чергу свідчить про наявність активної фільтрації як у вертикальному, так і горизонтальному напрямках. При цьому визначальну роль в оцінці гідрогеоекологічного стану території досліджень мають структурно-тектонічні особливості, для параметризації яких можуть бути використані відомі уявлення про системи докембрійських розломів земної кори, які встановлено за комплексом геолого-геофізичних даних (Гінтов, 2004; Tiapkin, Pihulevskiy, & Dovbnich; Pihulevskiy, Kendzera, & Babi, 2023). Загальновідомо, що особливості тектонічної (розломно-блокової) будови по суті визначають загальний геоекологічний стан будь-яких територій: до річок,

мережа яких зумовлена системами тектонічних розломів, тяжіють населені пункти та великі промислові виробництва; до цих розломів приурочено абсолютну більшість родовищ корисних копалин, при експлуатації яких на перший план висувуються проблема раціонального природокористування та пов'язані з ними природоохоронні заходи та навіть встановлені взаємозв'язки напрямків поширення забруднення, спричиненого переміщенням повітряних мас, з особливостями (розломно-блокової) будови (Batur, & Babii, 2022; Semenenko, Medvedieva, & Biliaiev, 2022; Tiapkin, Pihulevskiy, & Dovbnich, 2017; Pihulevskiy, Tiapkin, & Anisimova, 2018). Загалом зазначена геолого-геофізична інформація, у т. ч. про особливості тектонічної (розломно-блокової) будови може бути однією з основ для розробки методики розмежування часток небезпечного впливу гірничої промисловості та аграрного комплексу у формування загального геоекологічного стану конкретного регіону.

Дискусія і висновки

На основі узагальненого аналізу основних елементів, що забруднюють територію внаслідок сільськогосподарської діяльності, встановлено значний вплив міграції відповідних хімічних елементів на геохімічний стан ґрунтів, поверхневих і підземних вод. Порівняння основних забруднювальних елементів, що створюють небезпеку в результаті діяльності гірничодобувної та агропромислового комплексу, свідчить про їх значну токсичність (у т. ч. Р, Мп, Сu, Сr, Рb, Zn). Це іноді призводить до необґрунтованого перебільшення "гірничого" внеску в загальне забруднення сільськогосподарських територій від суміжних гірничих об'єктів.

На прикладі Південного Кривбасу показано, що до основних забруднювачів ґрунтів цієї території, поряд з наслідками гірничодобувної діяльності, належать внесені добрива та пестициди. Зафіксоване тут забруднення поверхневих вод, і насамперед р. Інгулець, значною мірою може бути наслідком діяльності агропромислового комплексу. Тобто для підземних вод об'єкти як гірничого, так і сільськогосподарського комплексу можуть спричиняти забруднення елементами як різного, так й майже однакового ступеня небезпеки.

Для розв'язання проблем раціонального природокористування слід розмежовувати небезпечний вплив (внесок) гірничодобувної промисловості та аграрного комплексу в забруднення основних компонентів довкілля. Але для цього недостатньо виключно геохімічних даних. Потрібна розробка локальних систем геоекологічного моніторингу гірничодобувних підприємств з прилеглими сільськогосподарськими землями – як інформаційних геолого-геофізичних систем підтримки необхідних управлінських рішень щодо раціонального природокористування в умовах наявності як промислових, так і сільськогосподарських джерел з відповідними шляхами просторово-часового поширення забруднення основних компонентів довкілля.

Внесок авторів: Петро Пігулевський – концептуалізація, написання (перегляд і редагування), методологія; Михайло Довбніч – написання (оригінальна чернетка), програмне забезпечення, валідація даних, формальний аналіз; Олег Тяпкін – написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування), концептуалізація, методологія; Ольга Медведєва – написання (оригінальна чернетка), валідація даних; Лариса Анісімова – написання (оригінальна чернетка), валідація даних, формальний аналіз.

Список використаних джерел

Anisimova L., Babii K., & Pihulevskiy P. (2022). Some hydrochemical features of water filtration sources from under the left-bank dumps. XVI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes

and Ecological Condition of the Environment". 15–18 November 2022, Kyiv, Ukraine. p. 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580188>

International Register of Potentially Toxic Chemicals, Global Environment Monitoring System, Monitoring and Assessment Research Centre Netherlands, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. (1992). UNEP. <https://digitallibrary.un.org/record/161613>

Batur, M., & Babii, K. (2022). Spatial assessment of air pollution due to mining and industrial activities: a case study of Kryvyi Rih Ukraine. III International Conference "Essays of Mining Science and Practice" IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 970 (012004). 13. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>

Grafe, M., Eick, M.J., & Grossel, P.R. (2001). Adsorption of arsenate (V) and arsenite (III) on goethite in the presence and absence of dissolved organic carbon. *Soil Science. Soc. Am. J.*, 65, 1680–1687. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1680>

Ivanik, O. M., Shevchuk, V. V., & Tustanovska, L.V. (2020). Estimation of neotectogenesis factors of the Middle Dnieper region by structural-morphometric method. International Conference Geoinformatics 2020, 11–14 May, 2020. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.99.01>

Jackson, B.P., & Miller, W.P. (2000). Effectiveness of phosphate and hydroxide for desorption of arsenic and selenium species from iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1616–1622. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451616x>

Manning, B.A., & Goldberg, S. (1996). Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 121–131. DOI:10.2136/sssaj1996.03615995006000010020x

Menshov, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 15–22.

Pigulevskiy, P., Svystun, V., Slobodyaniuk, S., & Kyryliuk, A. (2016). Studying of modern flooding of southwestern part Krivbas by geophysical methods. Geoinformatics 2016 – XVth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600477>

Pigulevskiy, P.I., & Svystun, V.K. (2021). Influence of technogenic objects on the development of landslides in the south of Kryvbass. Third EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities. 20–23 September 2021, Odessa, Ukraine. P. 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1018>

Pihulevskiy, P., Svystun, V., & Tiapkin, O. (2019). Monitoring (2019). Conference - Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: 12–15 November 2019. Repeated geophysical researches of hazardous geoecological processes near mining waste storage facilities of southern Kryvbass. 262–272. Curran Associates, Inc.

Pihulevskiy, P., Tiapkin, O., & Anisimova, L. (2018). Prediction of the azimuths of dangerous emissions of radioactive wastes stores. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: Proceedings of XII International Scientific Conference. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580063>

Pihulevskiy, P.H., Kendzera, O.V., & Babii, K.V. (2023). Connection of Kryvbass tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 5–10. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/005>

Semenenko, Ye.V., Medvedieva, O.O., & Biliaiev, N.N. (2022). Mathematical model for express evaluation of process of dust air pollution in tailing facility. *Геотехнічна механіка*, 162, 112–125. http://nbuv.gov.ua/UJRN/gtm_2022_162_12

Tiapkin, O.K., Pihulevskiy, P.H., & Dovbnich, M.M. (2017). Taking into account of influence of earth crust faults in solving geological and geoecological tasks by geophysical methods. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 15–22.

Tonkha, O., Menshov, O., Bykova, O., Pikovska, O., & Fedosiy, I. (2020). Magnetic methods application for the physical and chemical properties assessment of Ukraine soil. In XIV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment", 1, 1–5.

Багрий, І.Д., Блінов, П.В., & Белокопитова, Н.А. (2002). Геоєкологічні проблеми Криворізького басейну в умовах реструктуризації гірничодобувної галузі. *Фенікс*.

Багрий, І.Д., Гожик, П.Ф., & Самоткал, Е.В. (2005). Гідроєкосистема Криворізького басейну – стан і напрямки поліпшення. *Фенікс*.

Гинтов, О.Б. (2004). Зоны разломов Украинского щита. Влияние процессов разломообразования на формирование структуры земной коры. *Геофизический журнал*, 26(3), 3–24.

Губіна, В.Г., & Горлицький, Б.О. (2010). Залізцевмісні відходи України: стан та перспективи використання. *Логос*. <https://doi.org/10.32782/geotech2024.38.02>

Довгий, С.О., Іванченко, В.В., Коржнев, М.М., Трофимчук, О.М., & Яковлев, Є.О. (2021). Дослідження екологічного стану території пост-майнінгу в Україні на прикладі Криворізького басейну та його оточення. Ніка-Центр. <https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/12>

Довгий, С.О., Коржнев, М.М., & Трофимчук, О.М. (2017). Геологічна будова та сучасні геолого-економічні й екологічні умови видобутку і переробки залізних руд Криворізько-Кременчуцької зони. Ніка-Центр. https://itgip.org/2020/03/monografiya_kkz_4

Коржнев, М.М., & Малахов, І.М. (2012). Техногенні форми рельєфу та оцінка екологічних ризиків і збитків гірничодобувної діяльності у Криворізькому залізорудному басейні. *Вісник КНУ. Геологія*, 58, 46–50.

Пігулевський, П.Г., Тяпкін, О.К., & Свистун, В.К. (2018). Застосування геофізичних методів для вирішення гідрогеоекологічних завдань на території Південного Кривбасу. *Геофізичний журнал*, 40(3), 165–178.

Рудько, Г.І., & Яковлев, Є.О. (2018). Регіональні техногенні зміни еколого-геодинамічних умов розробки залізорудних родовищ Кривбасу. *Мінеральні ресурси України*, 2, 43–50. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2018_2_8

Тяпкін, О.К. (2006). Геофізичні методи вирішення геоекологічних завдань. *Моноліт*.

Шапар, А.Г., Скрипник, О.О., & Міхеев, О.В. (2018). Новітня парадигма вилучення природних ресурсів з навколишнього середовища. ІПРЕ НАН України.

References

Anisimova, L., Babyi, K., & Pihulevskiy, P. (2022). Some hydrochemical features of water filtration sources from under the left-bank dumps. XVI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment". 15–18 November 2022, Kyiv, Ukraine. p. 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580188>

Bagriy, I.D., Blinov, P.V., & Belokopytova, N.A. (2002). Geoecological problems of the Kryvyi Rih basin in the context of restructuring of the mining industry. *Phoenix* [in Ukrainian].

Bagriy, I.D., Gozhyk, P.F., & Samotkal, E.V. (2005). *Hydroecosystem of the Kryvyi Rih Basin – state and directions of improvement*. Phoenix.

Batur, M., & Babii, K. (2022). Spatial assessment of air pollution due to mining and industrial activities: a case study of Kryvyi Rih Ukraine. III International Conference "Essays of Mining Science and Practice" IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 970 (012004). 13. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>

Dovgiy, S.O., Ivanchenko, V.V., Korzhnev, M.M., Trofymchuk, O.M., & Yakovlev, E.O. (2021). Research on the ecological state of post-mining areas in Ukraine on the example of the Kryvyi Rih basin and its surroundings. *Nika-Center*. <https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/12> [in Ukrainian].

Dovhyy, S.O., Korzhnev, M.M., & Trofymchuk, O.M. (2017). *Geological structure and modern geological, economic and environmental conditions of mining and processing of iron ores of the Kryvyi Rih-Kremenchuk zone*. Nika-Center. https://itgip.org/2020/03/monografiya_kkz_4 [in Ukrainian]

Grafe, M., Eick, M.J., & Grossel, P.R. (2001). Adsorption of arsenate (V) and arsenite (III) on goethite in the presence and absence of dissolved organic carbon. *Soil Science. Soc. Am. J.*, 65, 1680–1687. [https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1680Gintov, O.B. \(2004\). Fault zones of the Ukrainian Shield. Influence of fault formation processes on the formation of the structure of the earth's crust. *Geophysical Journal*, 26\(3\), 3–24 \[in Ukrainian\].](https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1680Gintov, O.B. (2004). Fault zones of the Ukrainian Shield. Influence of fault formation processes on the formation of the structure of the earth's crust. Geophysical Journal, 26(3), 3–24 [in Ukrainian].)

Gubina, V.G., Gorlytskiy, B.O. (2010). *Iron-containing wastes of Ukraine: status and prospects of use*. Logos [in Ukrainian].

International Register of Potentially Toxic Chemicals, Global Environment Monitoring System, Monitoring and Assessment Research Centre Netherlands, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. (1992). UNEP. <https://digitallibrary.un.org/record/161613>

Ivanik, O. M., Shevchuk, V. V., & Tustanovska, L.V. (2020). Estimation of neotectogenesis factors of the Middle Dnieper region by structural-morphometric method. International Conference Geoinformatics 2020, 11–14 May, 2020. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.99.01>

Jackson, B.P., & Miller, W.P. (2000). Effectiveness of phosphate and hydroxide for desorption of arsenic and selenium species from iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1616–1622. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451616x>

Korzhnev, M.M., & Malakhov, I.M. (2012). Technogenic landforms and assessment of environmental risks and losses of mining activities in the Kryvyi Rih iron ore zone. pool. *Bulletin of the Kyiv National University. Geology*, 58, 46–50 [in Ukrainian].

Menshov, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 15–22.

Manning, B.A., & Goldberg, S. (1996). Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 121–131. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000010020x>

Pigulevskiy, P., Svystun, V., Slobodyaniuk, S., & Kyryliuk, A. (2016). Studying of modern flooding of southwestern part Krivbas by geophysical methods. Geoinformatics 2016 - XVth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600477>

Pigulevskiy, P.I., & Svystun, V.K. (2021). Influence of technogenic objects on the development of landslides in the south of Kryvbass. Third EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities. 20–23 September 2021, Odessa, Ukraine. P. 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1018>

Pigulevskiy, P.G., Tyapkin, O.K., & Svystun, V.K. (2018). Application of geophysical methods to solve hydrogeoecological problems in the territory of Southern Kryvbass. *Geophysical Journal*, 40(3), 165–178 [in Ukrainian].

Pihulevskiy, P., Svystun, V., & Tiapkin, O. (2019). Monitoring (2019). Conference - Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: 12–15 November 2019. Repeated geophysical researches of hazardous geoecological processes near mining waste storage facilities of southern Kryvbass. 262–272. Curran Associates, Inc.

Pihulevskiy, P., Tiapkin, O., & Anisimova, L. (2018). Prediction of the azimuths of dangerous emissions of radioactive wastes stores. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment:

Proceedings of XII International Scientific Conference. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580063>

Pihulevskyi, P.H., Kendzera, O.V., & Babiy K.V. (2023). Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 5–10. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/005>

Rudko, G.I., & Yakovlev, E.O. (2018). Regional technogenic changes in ecological and geodynamic conditions of development of iron ore deposits of Kryvbas. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 43–50. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2018_2_8 [in Ukrainian].

Semenenko, Ye.V., Medvedieva, O.O., & Biliaiev, N.N. (2022). Mathematical model for express evaluation of process of dust air pollution in tailing facility. *Геотехнічна механіка*, 162, 112–125. http://nbuv.gov.ua/UJRN/gtm_2022_162_12

Shapar, A.G., Skrypnyk, O.O., & Mikheev, O.V. (2018). *The latest paradigm of extracting natural resources from the environment*. IPPE NAS of Ukraine [in Ukrainian].

Tiapkin, O.K., Pihulevskyi, P.H., & Dovbnich, M.M. (2017). Taking into account of influence of earth crust faults in solving geological and geoeological tasks by geophysical methods. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 15–22.

Tonkha, O., Menshov, O., Bykova, O., Pikovska, O., & Fedosiy, I. (2020). Magnetic methods application for the physical and chemical properties assessment of Ukraine soil. In XIV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment", 1, 1–5.

Tyapkin, O.K. (2006). *Geophysical methods for solving geoeological problems*. Monolith [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 09.12.24

Прорецензовано / Revised: 30.01.25

Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Petro PIGULEVSKIY¹, DSc (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6163-4486
e-mail: pigulev@ua.fm

Mykhailo DOVBNICH², DSc (Geol.), Assos. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-9167-4630
e-mail: dovbnichm@gmail.com

Oleh TIAPKIN², DSc (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-2345-8343
e-mail: tiapkin.oleh@gmail.com

Oliha MEDVEDIEVA³, DSc (Techn.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-5575-713X
e-mail: medvedevaolga1702@gmail.com

Larysa ANISIMOVA³, PhD (Biol.)
ORCID ID: 0000-0003-3398-5400
e-mail: lanisimova@gmail.com

¹S.I. Subbotin institute of geophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

³M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

CUMULATIVE IMPACT OF THE MINING INDUSTRY AND AGRICULTURE ON THE HYDROGEOCHEMICAL STATE OF THE TERRITORY (BASED ON THE EXAMPLE OF SOUTHERN KRYVBAS)

Background. Southern Kryvbas is one of the most industrially loaded territories in southeastern Ukraine. Manmade changes in the environment are becoming irreversible, affecting the ecosystem, especially the soils. The presented studies conducted a general analysis of the mobility of the main chemical elements that pollute the territory adjacent to mining enterprises as a result of agricultural activities and determine the degree of influence of the migration of relevant chemical elements on the geochemical state of soils, surface, and groundwater.

Methods. To determine the degree and nature of manmade changes in the hydrogeochemical state of southern Kryvbas, a comparative-statistical analysis method was applied to generalize the results of previous hydrogeochemical studies of the impact of the mining industry and agriculture on the main components of the environment.

Results. As a result of the joint action of industrial and agricultural activity factors over a long period, new stable natural-manmade geosystems have formed. The main pollutants of soils, groundwater, surface waters, and bottom sediments in mining regions are waste from the mining industry and agricultural fertilizers. The analysis of the main pollutants shows that the contaminating components are practically identical. This leads to an unjustified exaggeration of the results of mining activities in the overall pollution of adjacent agricultural territories. It has been shown that it is insufficient to rely solely on geochemical data to distinguish the hazardous impact of the mining industry and agricultural complex on the pollution of a particular region. Additional spatial-temporal geological-geophysical studies of both the sources and pathways of specific types of pollution are necessary. At the same time, the structural-tectonic features play a decisive role in assessing the hydrogeoecological state of the research territory, for the parameterization of which the use of known concepts about the systems of Precambrian faults established based on a comprehensive set of geological-geophysical data is required.

Conclusions. It has been concluded that the migration of specific chemical elements has a significant impact on the geochemical state of soils, surface, and groundwater. The presence of spatial-depth geological-geophysical information about the features of tectonic (fault-block) structure is one of the foundations for the development of a methodology for distinguishing the elements of the hazardous impact of the mining industry and agricultural complex in the formation of the overall hydrogeochemical state of a specific region.

Keywords. mining industry waste, hydrogeochemistry, fertilizers, mobile forms of chemical elements, geological-geophysical information, tectonic structure, crustal faults, chemical contamination of soils, surface and groundwater.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.