

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.04.073>
УДК 553.94:550.42

В.В. Ішков, канд. геол.-мін. наук, доцент
Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"
49005, м. Дніпро, Україна, пр-т Дмитра Яворницького, 19
E-mail: ishwhw37@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3987-208X>
Є.С. Козій, канд. геол. наук, заст. директора
Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"
49005, м. Дніпро, Україна, пр-т Дмитра Яворницького, 19
E-mail: koziy.es@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2167-6224>

РОЗПОДІЛ АРСЕНУ ТА РТУТІ У ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ k_5 ШАХТИ "КАПІТАЛЬНА", ДОНБАС

Встановлення особливостей розподілу арсену та ртуті у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна" та основних генетичних чинників, що їх обумовлюють — мета досліджень. Об'єкт досліджень — вугільний пласт k_5 у межах поля шахти "Капітальна", Красноармійського геолого-промислового району Донбасу. Методика досліджень передбачала послідовне виконання таких етапів: відбір проб вугілля з гірських виробок та з дублікатів керна свердловин у період 1981—2014 рр.; виділення з матеріалу цих проб речовини неорганічної частини вугільного пласта, що була за допомогою стандартних мінералогічних методів макроскопічно діагностована як сульфідна, силікатна та карбонатна фракції, які зі свого боку поділено на групи сингенетичного й епігенетичного походження; аналіз мінерального складу речовини кожної із цих груп виконувався на трьох різномасштабних рівнях: макрорівні — візуально стандартними мінералогічними методами; мікрорівні — методами оптичної мікроскопії за допомогою мікроскопів МІН-8 та МБС-9; ультрамікрорівні — за допомогою методу рентгеноструктурного аналізу; проведення фракційного аналізу за щільністю вугілля із матеріалу дублікатів вихідних проб до виділення речовини неорганічної частини вугільного пласта; встановлення вмісту арсену та ртуті у речовині всіх вихідних і кінцевих проб тощо. Основним результатом роботи є встановлення генетичного зв'язку підвищених концентрацій арсену та ртуті у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна" з тектонічними порушеннями субширотного напрямку, які є апофізами Центрального насуву і пов'язаною з ними зоною підвищеної тріщинуватості. Науковою новизною роботи є встановлення переважного епігенетичного характеру накопичення арсену та ртуті у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна", також остаточно доведено наявність арсену та ртуті в органічній складовій вугілля розглянутого пласта. Практичне значення роботи полягає у побудові карт ізоконцентрат арсену і ртуті та встановленні того факту, що виявлена висока концентрація розглянутих елементів у вугіллі фракцій великої щільності буде призводити до їхнього накопичення у відходах гравітаційного збагачення.

Ключові слова: арсен, ртуть, токсичні елементи, геолого-промисловий район, коефіцієнт кореляції, лінійне рівняння регресії, статистичний зв'язок.

Вступ. На сьогодні для вирішення складних екологічних питань у вуглевидобувних регіонах, дослідження токсичних і потенційно токсичних елементів у вугільних пластах (до яких зокрема належать ртуть і арсен [9]) є обов'язковими, що дає змогу визначати вплив на довкілля вугледобувних і вуглезбагачувальних

підприємств, а також установ вугільної теплоенергетики.

Вивчення особливостей розподілу токсичних елементів у вугіллі пов'язано із зростанням вимог до охорони навколишнього середовища, які обумовлюють потребу в нових науково обґрунтованих методах прогнозування вмісту

Цитування: Ішков В.В., Козій Є.С. Розподіл арсену та ртуті у вугільному пласті k_5 шахти "Капітальна", Донбас. *Мінерал. журн.* 2021. 43, № 4. С. 73—86. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.04.073>

токсичних елементів у гірській масі, що видобувається шахтами та є у відходах видобутку і вуглезабагачення.

Вміст ртуті й арсену у вугіллі привертає особливу увагу фахівців у області екологічної геохімії через їхні високі концентрації у вугільних пластах, здатність накопичуватися у живих організмах та токсичність. Актуальність цієї проблеми визначається законом України "Про оцінку впливу на довкілля" від 23.05.2017 р. № 2059-VIII [27].

Питанню вивчення геохімії токсичних та потенційно токсичних елементів-домішок вугілля присвячено багато робіт. Так, Я.Е. Юдович з М.П. Кетрис систематизували деякі раніше опубліковані дані про елементи-домішки у вугіллі Донбасу [32]. Авторами досліджувалися всі елементи у вугіллі родовищ світу, які є небезпечними для довкілля, зокрема ртуть і арсен.

І.В. Бучинська вивчала геохімію вугілля геолого-промислових районів Львівсько-Волинського басейну. Вона побудувала карти ізоконцентрат елементів-домішок з вугільних пластів та проаналізувала їхнє площинне поширення, а також умови утворення аномальних концентрацій [2].

Варто зазначити численні роботи А.Ф. Горюго і Н.А. Горюгої [3–5], які займалися вивченням розподілу та вмісту токсичних елементів у продуктах видобутку й відходах перероблення антрацитів декількох геолого-промислових районів Донбасу. Ці автори створили кадастр "токсичності" гірничої маси, вугілля, золи вугілля, продуктів видобутку й відходів перероблення вугілля, а також побудували прогнозні картографічні схеми його "токсичності".

З оцінкою вугільних родовищ, як супутнього джерела дорогоцінних металів і впливу токсичних елементів на навколишнє середовище, пов'язані роботи О.Р. Куліненка і Т.В. Барни [25]. З метою реконструкції умов торфонакопичення Т.В. Барною було проведено детальне вивчення "супутніх елементів" вугільного пласта c_{11} на шахті "ім. Героїв Космосу" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району по 24 перетинах.

В.В. Ішковим разом з А.І. Чорнобук, Д.Я. Михальчонок, В.В. Дворецьким [17, 18] досліджено особливості розподілу цілого ряду токсичних та потенційно токсичних елементів у продуктах й відходах збагачення Краснолиманської й Добропільської вуглезабагачувальних фабрик Донбасу.

У попередніх роботах авторами [10–12, 14–16, 19–24] досліджено особливості розподілу токсичних й потенційно токсичних елементів у вугільних пластах Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Західного Донбасу, Донецько-Макіївського геолого-промислового району [46] та берилію у вугільному пласті k_5 шахти "Капітальна" [13]. До сьогодні розподіл ртуті й арсену у вугільному пласті k_5 шахти "Капітальна" не досліджувався.

Мета цієї роботи полягає у встановленні особливостей розподілу арсену і ртуті у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна" та основних генетичних причин, що їх обумовлюють. Об'єкт дослідження — вугільний пласт k_5 в межах поля шахти "Капітальна", яка розташована у Красноармійському геолого-промислового районі.

Методи. Особливість виконаних досліджень полягає у неможливості безпосереднього спостереження геологічних процесів, пов'язаних із накопиченням та розподілом елементів у геологічних об'єктах. У таких випадках вивчення їх динаміки традиційно виконується шляхом порівняння статистичних даних й аналізування картографічних матеріалів стосовно розподілу хімічних елементів на цих об'єктах. Отримані результати аналізуються з урахуванням фізико-хімічних й геологічних особливостей. Тобто, отримання інформації щодо розподілу хімічних елементів у геологічних об'єктах є першим етапом дослідження, що йде від узагальнення фактичного матеріалу, через його теоретичне осмислення до перевірки виявлених закономірностей дослідним шляхом.

Проби відібрано в гірських виробках (пластові проби, відібрані борозновим способом [30]) та з дублікатів керна особисто авторами за участю співробітників геологічних служб вугледобувних підприємств і різних виробничих геологорозвідувальних організацій за період 1981–2014 рр. Обсяг контрольного випробування становив 5 % від загального обсягу проб.

Макроскопічно за допомогою стандартних мінералогічних методів із матеріалу цих проб було виділено сульфідні, силікатні і карбонатні фракції.

Кожна мінеральна фракція із неорганічної частини вугільного пласта k_5 відбиралася цілеспрямовано в гірських виробках шахти і керна з восьми свердловин. Усього було відібрано 30 проб кожної мінеральної фракції. Насамперед по візуально макроскопічно помітних текс-

турно-структурних ознаках кожна з них поділялась на дві групи (по 15 проб у кожній). У першій групі проб були зразки, що мали явні ознаки сингенетичного утворення. На прикладі сульфідної фракції це були, як правило, поодинокі вкраплення у вугіллі кристалів розміром не більше 4 мм та їх зростків, що утворювали незначні сферичні конкреції та дрібні лінзоподібні прошарки, розташовані згідно з загальною шаруватістю пласта і не ближче 5 см від тріщини. У другій групі були сульфідні зразки яких мали всі безперечні ознаки епігенетичного утворення. Їх відібрано з матеріалу тріщин, що є січними, відносно вугільного пласта. Аналогічно відібрано проби силікатних та карбонатних фракцій.

Мінеральний склад фракцій контролювався за допомогою методів оптичної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу. За комплексом текстурних ознак визначались їх епігенетична чи сингенетична природа. Кількість вуглисто-мінеральних зростків по окремих фракціях не перевищувала 10 %. Отже, ідентифікація мінерального складу неорганічної частини вугільних пластів відбувалася на трьох різномасштабних рівнях: макрорівні — візуально стандартними мінералогічними методами; мікрорівні — за допомогою методів оптичної мікроскопії мікроскопами МІН-8 та МБС-9; ультрамікрорівні — за допомогою методу рентгеноструктурного аналізу.

Всі аналітичні роботи виконувалися в центральних сертифікованих лабораторіях виробничих геологорозвідувальних організацій. Вміст ртуті визначався атомно-абсорбційним аналізом, а арсену — згідно з [29]. На внутрішній лабораторний контроль направлено 7 % дублікатів проб. Зовнішньому лабораторному контролю піддано 10 % дублікатів проб. Якість результатів аналізів (правильність і відтворюваність) оцінювалася як значимість середньої систематичної похибки, яка перевіряється за допомогою критерію Стьюдента і значимість середньої випадкової похибки, що перевіряється за допомогою критерію Фішера. Оскільки вказані похибки за рівня значимості 0,95 були не значимими, якість аналізів визнано задовільною.

За допомогою програм *Excel 2016* і *Statistica 11.0* на початковому етапі оброблення первинної геохімічної інформації розраховувалися значення основних описових статистичних показників, виконувалася побудова частотних

гістограм вмісту та встановлення законів розподілу ртуті й арсену.

Під час оцінювання зв'язку цих елементів з органічною або мінеральною складовою вугілля використовувались: коефіцієнти спорідненості з органічною речовиною F_o , що показують відношення вмісту елементів у вугіллі з малою (<1,3) і високою щільністю (>2,2 г/см³), отже, 28 проб розділено на 10 фракцій; коефіцієнти наведеної концентрації $F_{нк}$, які показують відношення вмісту елементів у фракції (C_i) до вмісту у вихідному вугіллі; коефіцієнти кореляції нормованих значень вмісту досліджуваних елементів і зольності вугілля, а також коефіцієнти наведеного вилучення елемента у фракції різної щільності.

Для побудови усіх карт використовувалася програма *Surfer 11*. У ході побудови карт, графіків, розрахунку коефіцієнтів кореляції та рівнянь регресії всі значення концентрацій ртуті та арсену й технологічних параметрів вугілля нормувались за формулою:

$$X_{\text{норм}} = (X_i - X_{\text{min}}) / (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}),$$

де X_i — результат одиничного значення концентрації елемента; X_{max} — результат максимального значення концентрації елемента; X_{min} — результат мінімального значення концентрації елемента.

Нормування здійснювалося для зведення вибірки до одного масштабу незалежно від одиниць виміру та розмаху значень у вибірках.

Результати. Шахта "Капітальна" (до 2010 р. шахта "Стаханова") — одна із найбільших шахт України, розташована у м. Мирноград Донецької області. Вона розташована в центральній частині Красноармійського геолого-промислового району. Загальна площа шахтного поля становить 60 км², в середньому 17 км за простяганням і 3,5 км за падінням. Вугільний пласт k_5 має потужність 0,55—2,2 м і представлений маркуванням від Г до Ж.

У межах поля шахти "Капітальна" концентрація арсену по пласту k_5 змінюється від 34,8 до 61,5 г/т, за середнього значення по пласту 44,66 г/т. Це в 4,96 рази перевищує кларк арсену для кам'яного вугілля світу, що наведено у [32]. На побудованій карті ізоконцентрат можна виділити одну значну зону підвищеного вмісту арсену. Вона розташована на ділянці свердловин № 10297, № 2877, № 2952 та № 232 у північно-західній частині шахтного поля (рис. 1), із вмістом арсену, г/т: 61,5; 56; 55,3;

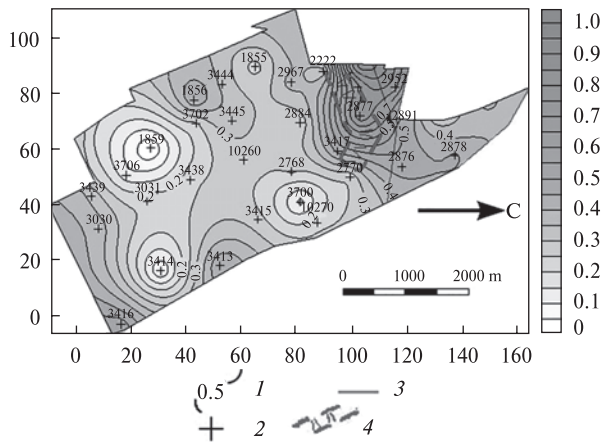


Рис. 1. Карта ізоконцентрат нормованого вмісту As у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна". Тут і далі: 1 — ізолінії нормованого вмісту; 2 — свердловини; 3 — розривні порушення; 4 — зона підвищеної тріщинуватості

Fig. 1. Map of isoconcentrates of normalized As content in the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna". Here in after: 1 — isolines of normalized content; 2 — well bores; 3 — faults; 4 — zone of increased fracture

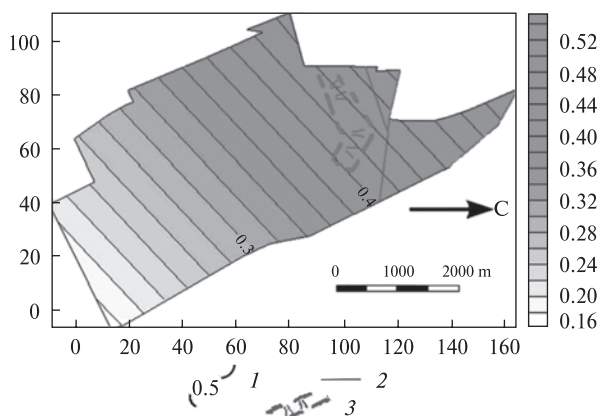


Рис. 2. Карта зміни регіональної складової нормованого вмісту As у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна". Тут і далі: 1 — ізолінії нормованого вмісту; 2 — розривні порушення; 3 — зона підвищеної тріщинуватості

Fig. 2. Map of changes in the regional component of the normalized As content in the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna". Here in after: 1 — isolines of normalized content; 2 — faults; 3 — zone of increased fracture

54,3 відповідно. Ця зона просторово приурочена до розривних порушень західного й південно-західного простягання та ділянки підвищеної тріщинуватості вуглевмісних порід, що генетично пов'язано з цими порушеннями. Мінімальне значення вмісту арсену вугільного пласта відзначено в керні із св. № 1859, яка розташована на південному заході й становить 34,8 г/т.

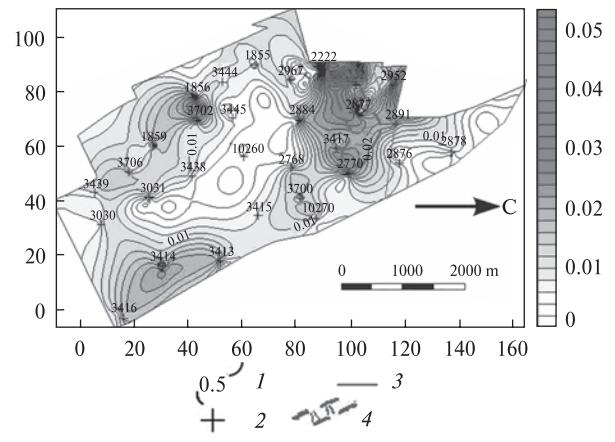


Рис. 3. Карта значень градієнта нормованої концентрації As у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна"

У регіональному плані (рис. 2) у межах поля шахти "Капітальна" концентрація арсену збільшується в північно-західному напрямку.

На карті значень градієнтів концентрації арсену по площі вугільного пласта k_5 (рис. 3), яка дає змогу наочно візуалізувати її мінливість, а отже, й інтегральну мінливість факторів, які впливають на вміст цього елемента, чітко виділяється зона підвищених значень у північно-західній частині шахтного поля. Вона розташована на ділянці біля св. № 2222, № 232, № 3417 та № 2770 і майже повністю збігається з зоною підвищеної тріщинуватості, що пов'язана із субширотними тектонічними порушеннями.

Концентрація ртуті по пласту k_5 змінюється в межах від 0,26 до 0,53 г/т, за середнього значення по пласту 0,35 г/т. Це в 3,5 рази перевищує кларк ртуті для кам'яного вугілля світу, що наведено у [32]. На карті ізоконцентрат нормованого вмісту ртуті на загальному фоні виділено одну ділянку з аномально підвищеним вмістом ртуті. Вона, як і у випадку із арсеном, просторово пов'язана із розривними порушеннями західного й південно-західного простягання, та збігається із зоною підвищеної тріщинуватості, що генетично пов'язано з цими порушеннями. Ця ділянка локалізована біля св. № 10297, № 2952, № 2877 й № 232 у північно-західній частині шахтного поля (рис. 4), із концентраціями ртуті у вугіллі проб з керна цих св. 0,53 г/т, 0,5 г/т, 0,47 г/т й 0,46 г/т відповідно. Мінімальне значення вмісту ртуті (0,26 г/т) у вугільному пласті відзначено у про-

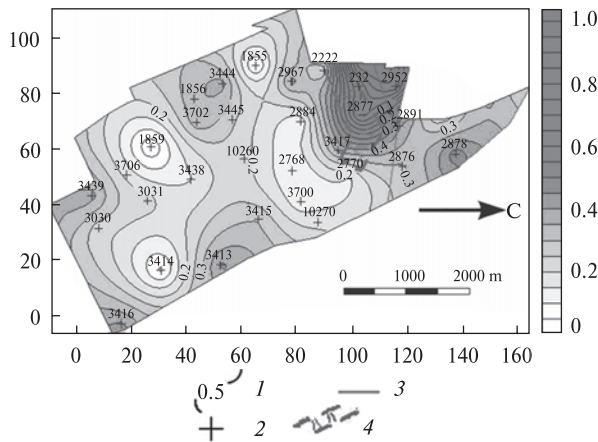


Рис. 4. Карта ізоконцентрат нормованого вмісту Hg у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна"
 Fig. 4. Map of isoconcentrates of normalized Hg content in the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna"

бах з керну св. № 1859, яка розташована на південному заході. У регіональному плані (рис. 5) концентрація ртуті у межах поля шахти "Капітальна" збільшується в північно-західному напрямку.

На карті значень градієнтів концентрації ртуті по площі вугільного пласта k_5 (рис. 6), як і у випадку із арсеном, виділяється зона підвищених значень, яка розташована в північно-західній частині поля шахти, біля св. № 2222, № 232, № 3417 та № 2770. Так само, як і у випадку із арсеном, вона просторово майже повністю збігається із зоною підвищеної тріщинуватості.

Аналіз побудованих карт (рис. 1, 3, 4 і 6) та їх зіставлення з даними результатів геологорозвідувальних та експлуатаційних робіт, виконаних по пласту k_5 , свідчить про наявність, принаймні, просторового зв'язку ділянки з підвищеною концентрацією ртуті й арсену із зоною підвищеної тріщинуватості, яка зі свого боку, генетично обумовлена особливостями формування тектонічних порушень субширотного напрямку (апофізами Центрального насуву). Зростання регіональної складової нормованого вмісту цих елементів у вугільному пласті k_5 також спостерігається у загальному напрямку до Центрального насуву (рис. 2 і 5). Це дає підставу припустити, що формування підвищених концентрацій ртуті й арсену у вугіллі пласта носило епігенетичний характер і пов'язане з особливостями загальних геодинамічних процесів, які суттєво впливали на речовинний склад вже сформованої вугленосної товщі.

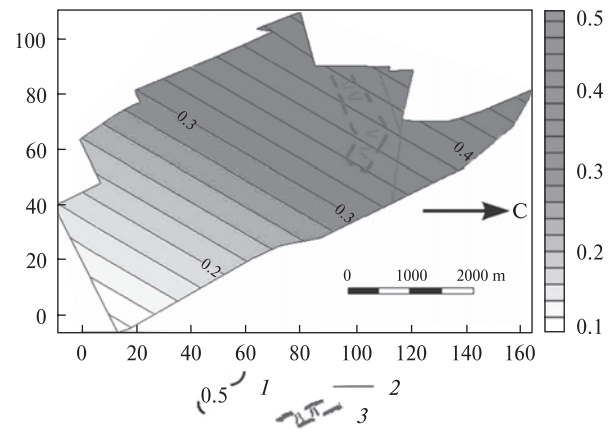


Рис. 5. Карта зміни регіональної складової нормованого вмісту Hg у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна"
 Fig. 5. Map of changes in the regional component of the normalized Hg content in the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna"

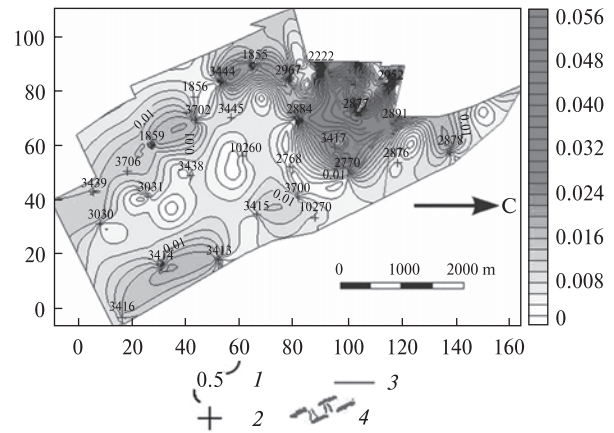


Рис. 6. Карта значень градієнта нормованої концентрації Hg у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна"
 Fig. 6. Gradient map of the normalized concentration of Hg in the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna"

Стосовно вмісту ртуті у вугіллі Донбасу присвячено значний обсяг наукових джерел, спробу узагальнення яких здійснили О.Г. Дворніков і С.І. Кирикилиця у роботі [7]. За їхніми даними, у розподілі ртуті проявляється полімодальність: разом з фоновими значеннями виділяються підвищені й аномально високі. Автори доводять загальний тектонічний контроль "ртутоносності" вугілля. Ідею, стосовно генетичного зв'язку аномально високих концентрацій ртуті й арсену з наявністю розривних порушень і особливо пов'язаних з ними зон екзогенної тріщинуватості, підтверджено результатами наших попередніх досліджень особливостей розподілу цих елементів у вугільних пластах активних шахт Павлоградсько-Петро-

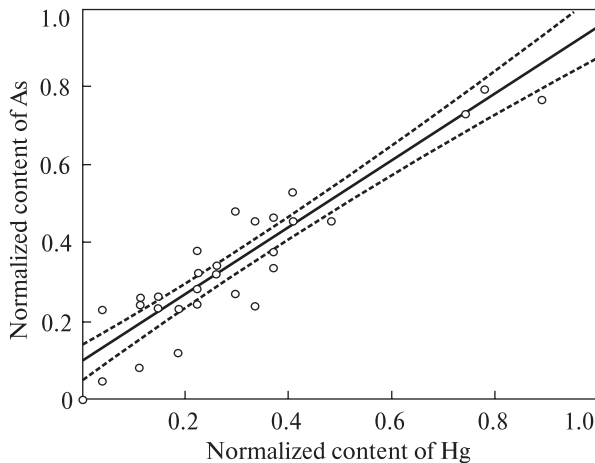


Рис. 7. Графік рівняння регресії між вмістом арсену та ртуті вугільного пласта k_5 поля шахти "Капітальна"
Fig. 7. Graph of the regression equation between the normalized content of arsenic and mercury of the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna"

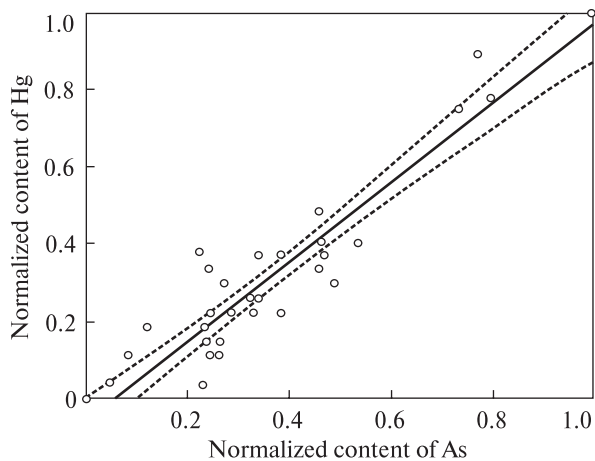


Рис. 8. Графік рівняння регресії між нормованими значеннями вмісту ртуті й арсену вугільного пласта k_5 поля шахти "Капітальна"
Fig. 8. Graph of the regression equation between the normalized content of mercury and arsenic of the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna"

павлівського геолого-промислового району [10—12, 14—16, 19—24]. Локалізація аномальної зони концентрацій ртуті й арсену, а також їхніх максимальних градієнтів по пласту k_5 шахти Капітальна саме в зоні підвищеної тріщинуватості свідчить, що субширотні розривні порушення слугували транзитним каналом, а зона підвищеної тріщинуватості відіграла контролювальну роль в їх накопиченні. Подібна картина впливу тектонічного фактора спостерігається і на родовищах антрацитів пермського, і триасового віку китайської провінції

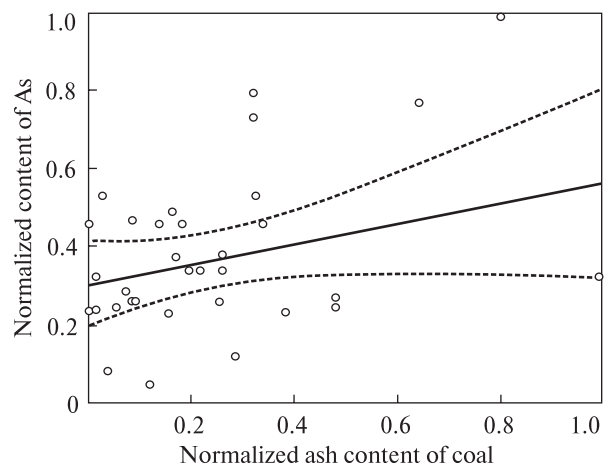


Рис. 9. Графік рівняння регресії між нормованими значеннями вмісту арсену та зольності вугільного пласта k_5 поля шахти "Капітальна"
Fig. 9. Graph of the regression equation between the normalized content of arsenic and ash of the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna"

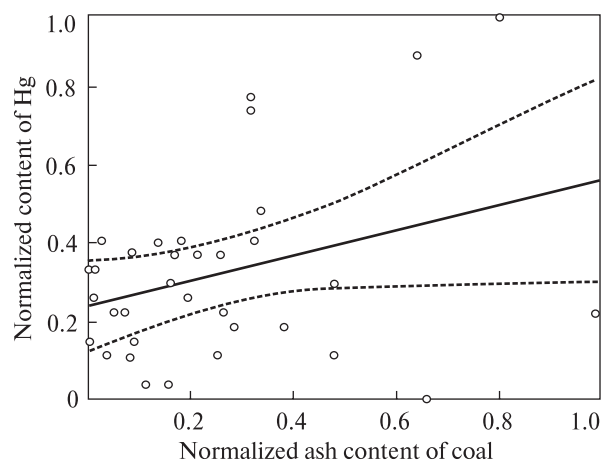


Рис. 10. Графік рівняння регресії між нормованими значеннями вмісту ртуті та зольності вугільного пласта k_5 поля шахти "Капітальна"
Fig. 10. Graph of the regression equation between the normalized content of mercury and ash of the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna"

Гуйчжоу (Guizhōu) [37, 41]. Там максимальні концентрації ртуті й арсену у вугільних пластах формують ділянки поблизу тектонічних порушень, розташованих субпаралельно осі регіональної антиклінальної структури.

Лінійне рівняння регресії, що характеризує зв'язок між нормованим вмістом арсену та ртуті у вугільному пласті k_5 : $As = 0,0947 + 0,8605 \times h$ (рис. 7), а ртуті та арсену: $Hg = -0,0599 + 1,0263 \times As$ (рис. 8). Коефіцієнт кореляції між значеннями вмісту арсену та ртуті дорівнює 0,94, що вказує на наявність

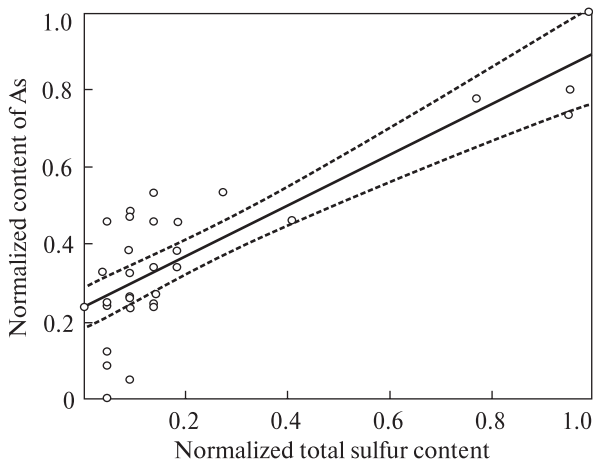


Рис. 11. Графік рівняння регресії між нормованими вмістом арсену та вмістом сірки загальної вугільного пласта k_5

Fig. 11. Graph of the regression equation between the normalized content of arsenic and total sulfur content of the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna"

дуже сильного прямого кореляційного зв'язку між цими параметрами.

Лінійне рівняння регресії, що характеризує зв'язок між нормованими значеннями вмісту арсену та зольності вугілля: $As = 0,3047 + 0,2555 \times A^d$ (рис. 9). Коефіцієнт кореляції між значеннями вмісту арсену та зольності вугілля пласта k_5 дорівнює 0,28, що вказує на наявність слабого прямого кореляційного зв'язку між цими параметрами.

Лінійне рівняння регресії, що характеризує зв'язок між нормованими значеннями вмісту ртуті та зольності вугілля: $Hg = 0,2373 + 0,3232 \times A^d$ (рис. 10). Коефіцієнт кореляції між значеннями вмісту ртуті та зольності вугілля пласта k_5 дорівнює 0,33, що вказує, як і у випадку з арсеном, на наявність слабого прямого кореляційного зв'язку між цими параметрами.

Подібний позитивний зв'язок арсену та ртуті з зольністю вугільних пластів зазначено на вугільних родовищах Бельгії [34], Болгарії [38], Греції [43], Індії [45], Казахстану [1], Канади [44] та США [36].

Згідно з О.О. Сауковим, накопичення ртуті в алюмосилікатному матеріалі осадових порід є результатом потужного поглинання цього елемента дисперсними фазами, насамперед, глинистою речовиною [28]. Є всі підстави припускати наявність подібного механізму й у випадку з арсеном. У роботі [32] автори вказують, що проходження вмісту арсену та ртуті через мак-

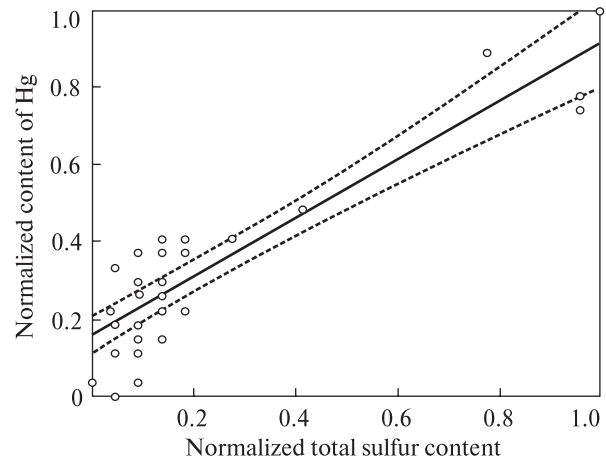


Рис. 12. Графік рівняння регресії між вмістом ртуті та вмістом сірки загальної вугільного пласта k_5 поля шахти "Капітальна"

Fig. 12. Graph of the regression equation between the normalized content of mercury and total sulfur content of the coal seam k_5 of the minefield "Kapitalna"

симум за середніх значень зольності свідчить про наявність органічних концентраторів цих елементів у вугіллі, і в цьому випадку їх кореляційний зв'язок із зольністю може проявлятися слабо. Таке припущення повністю підтверджується встановленим нами характером зв'язку ртуті та арсену із зольністю пласта k_5 шахти Капітальна (рис. 9, 10).

З метою кількісного встановлення зв'язку розглянутих елементів з органічною та мінеральною складовою вугілля пласта виконано фракційний аналіз за щільністю. Його результати наведено у табл. 1.

Розгляд результатів аналізу вмісту арсену та ртуті у вугіллі фракцій з різною щільністю, наведених у табл. 1, та геохімічних особливостей цих елементів дає змогу зробити певні висновки. По-перше, у вугіллі розглянутого пласта присутня частка арсену і ртуті, яка пов'язана з органічною складовою вугілля. Саме вона домінує у фракції щільності $<1,3 \text{ г/см}^3$. Отже, можна вважати, що середній вміст арсену та ртуті в органічній складовій вугілля пласта становить, відповідно, 9,32 та 0,17 г/т. Необхідно зазначити, що накопичення арсену та ртуті в органічній частині вугілля може бути результатом епігенетичних процесів. Експериментально доведено сорбцію газоподібної ртуті органічною речовиною вугілля [31], а для арсену допускається ще й комплексування з гідроксильними функціональними групами органічної речовини вугілля [35]. По-друге, у фрак-

Таблиця 1. Середній вміст арсену та ртуті у вугіллі фракцій з різною щільністю

Table 1. The average content of arsenic and mercury in coal fractions with different densities

Щільність фракцій вугілля, г/см ³	<1,3	1,3–1,4	1,4–1,5	1,5–1,6	1,6–1,7	1,7–1,8	1,8–1,9	1,9–2,0	2,0–2,2	>2,2
Середній вміст арсену, г/т	9,32	21,84	25,64	32,45	36,59	36,92	57,32	68,13	92,59	138,46
Середній вміст ртуті, г/т	0,17	0,39	0,46	0,61	0,63	0,69	1,75	4,28	5,74	7,23
Середній коефіцієнт наведеної концентрації арсену	0,22	0,51	0,60	0,85	0,86	1,32	1,59	1,74	2,17	3,25
Середній коефіцієнт наведеної концентрації ртуті	0,52	1,18	1,39	1,85	1,91	2,10	5,30	12,97	17,39	21,91

Таблиця 2. Результати аналізу проб мінеральної складової вугілля

Table 2. The results analysis of samples of the mineral component of coal

Назва фракції	Склад фракції за результатами макро- і мікроскопічного дослідження	Склад фракції за результатами рентгеноструктурного дослідження	Середній вміст ртуті в цілому по фракції, г/т	Середній вміст ртуті окремо по групах син- і епігенетичного походження речовини фракції, г/т	Середній вміст арсену в цілому по фракції, г/т	Середній вміст арсену окремо по групах син- і епігенетичного походження речовини фракції, г/т
Сульфідна сингенетична	Пірит	Пірит, а також нетипові: піролюзит, каолінит, кварц, гематит	1,49	0,8	242,9	164,57
Сульфідна епігенетична	Пірит	Пірит, галеніт, халькопірит, сфалерит, а також нетипові: піролюзит, дикіт*, кварц, гематит		4,9		625,36
Силікатна сингенетична	Кварц і глинисто-гідрослюди́ста речовина (переважно каолініт-іліттового складу)	Кварц, каолінит, іліт, мусковіт, галуазит, пірит, кальцит і сидерит	0,61	0,29	7,68	6,52
Силікатна епігенетична	Кварц і глинисто-гідрослюди́ста речовина (переважно каолініт-іліттового складу)	Кварц, каолінит, іліт, дикіт*, накріт, монтморилоніт, галуазит, а також нетипові: пірит, кальцит і сидерит		0,77		8,14
Карбонатна сингенетична	Кальцит	Кальцит, сидерит, а також нетипові: каолінит, кварц та іліт	0,09	0,06	11,04	10,61
Карбонатна епігенетична	Кальцит	Кальцит, доломіт, сидерит, анкерит, а також нетипові: кварц, каолінит та дикіт*		0,28		12,97

* Раніше дикіт вперше макро- і мікроскопічно діагностовано у гідротермально змінених вуглевмісних породах Красноармійського геолого-промислового району [10].

* Earlier, dykit was first diagnosed macro- and microscopically in hydrothermally altered coal-bearing rocks of the Krasnoarmiyskiy geological and industrial area [10].

ціях щільності 1,3—1,8 г/см³ істотну роль в концентрації цих елементів, імовірно, відіграють алюмосилікатна й карбонатна складові мінеральної частини вугілля. По-третє, з фракції щільністю 1,8 і вище (це особливо наочно проявлено у фракції щільністю >2,2), головну роль у накопиченні арсену та ртуті відіграє саме сульфідна частина мінеральної складової вугілля. Другий та третій висновки було підтверджено результатами мікроскопічних досліджень препаратів, виготовлених з матеріалу різних фракцій. По-четверте, висока концентрація розглянутих елементів у фракціях великої щільності буде призводити до їхнього накопичення у відходах гравітаційного збагачення, причому вміст може істотно перевищувати гранично допустимі концентрації (ГДК).

Лінійне рівняння регресії, що характеризує зв'язок між нормованими вмістом арсену та вмістом сірки загальної вугільного пласта k_5 : $As = 0,2313 + 0,6546 \times S_t^d$ (рис. 11). Коефіцієнт кореляції між значеннями вмісту арсену та вмістом сірки загальної дорівнює 0,84, що вказує на наявність дуже високого прямого кореляційного зв'язку між цими параметрами.

Лінійне рівняння регресії, що характеризує зв'язок між нормованими вмістом ртуті та вмістом сірки загальної вугільного пласта k_5 : $Hg = 0,1593 + 0,758 \times S_t^d$ (рис. 12). Коефіцієнт кореляції між значеннями вмісту ртуті і вмістом сірки загальної дорівнює 0,89, що вказує на наявність дуже високого прямого кореляційного зв'язку між цими параметрами.

Загалом прямий кореляційний зв'язок між концентраціями арсену та ртуті з вмістом сірки відзначається на багатьох вугільних родовищах [39].

Я.Е. Юдович і М.П. Кетріс [32] вказують, що у вугіллі можна очікувати наявність принаймні трьох форм ртуті та арсену: в складі органічної речовини, силікатної складової мінеральної речовини і її сульфідної фракції. Ми загалом поділяємо ці погляди. Але для генетичної інтерпретації та встановлення вкладу різних форм-носіїв, хоча б на якісному рівні, простої констатації наявності тих чи інших форм, що можливо вміщують ці елементи, явно недостатньо. Саме для з'ясування цих обставин нами відібрано з гірничих виробок по 30 проб сульфідної, силікатної та карбонатної фракції мінеральної частини вугілля (по 15 проб з кожної фракції з однозначними ознаками сингенетичного й епігенетичного поход-

ження). Результати аналізу мінеральної складової за результатами макро- і мікроскопічного, а також за результатами рентгеноструктурного досліджень і складу цих проб вугілля на ртуть і арсен наведено в табл. 2.

Аналіз даних, наведених у табл. 2, дає змогу однозначно судити про вирішальну роль епігенетичних процесів у формуванні аномально високих концентрацій арсену і ртуті у вугільному пласті k_5 шахти Капітальна. Середній вміст арсену і ртуті у всіх мінеральних фракціях істотно вищий в матеріалі епігенетичного походження. При цьому необхідно особливо підкреслити головну участь сульфідної фракції у складі мінеральної складової вугілля пласта в загальній, інтегральній концентрації розглянутих елементів. Важливо відзначити, що цей висновок підтверджується як непрямыми результатами досліджень (наявність дуже високого тісного прямого кореляційного зв'язку між вмістом арсену та ртуті з концентрацією сірки загальної), так і прямими даними (результатами аналізів макроскопічно виділеного піриту із вугільного пласта у гірських виробках).

Повсюдне знаходження арсену та ртуті у піриті, що відзначається багатьма дослідниками [24, 40, 42, 47], може бути результатом різних процесів. По-перше, у піриті можуть міститися мікровключення власних мінеральних фаз цих елементів. Наприклад, О.Г. Дворніков у роботі [6] зазначає наявність кіноварі в прожилках і жовнях піриту з явними ознаками епігенезу у вугіллі поблизу сульфідних рудних тіл. Аналогічну ситуацію описано Е.С. Мейтовим [26] у вугіллі Іргенського родовища (Східний Сибір, РФ). Дослідження зразків вугілля з родовищ провінції Гуйчжоу виявило зростки піриту з арсенопіритом [33]. По-друге, вважається, що арсен і ртуть можуть ізоморфно входити в структуру піриту [8, 40]. По-третє, унаслідок своїх особливих властивостей пірит може виконувати функції своєрідного "колектора" відносно до цих елементів і поглинати їх з газово-рідкого флюїду навколишнього середовища [31, 40]. Незважаючи на всі розбіжності механізмів перерахованих процесів, необхідно зазначити, що їх масштабна реалізація можлива тільки внаслідок епігенетичних перетворень вугленосної товщі під впливом різних геодинамічних чинників.

Наукова новизна і практична значущість. Головне наукове значення отриманих результатів полягає у встановленні основних особливос-

тей мінливості розподілу арсену і ртуті у вугіллі пласта і їхніх генетичних причин. Практичне значення отриманих результатів в тому, що побудовані карти є фактологічною основою для довгострокового прогнозу концентрацій цих елементів у видобутій шахтою гірничій масі. Розраховані рівняння регресії між вмістом арсену і ртуті та зольності й сірки загальної дають змогу прогнозувати концентрацію цих елементів у вугільному пласті. Ці рівняння можуть бути використані для коротко- і середньострокового прогнозу їхнього вмісту в гірничій масі, що видобувається шахтою. Такий прогноз слугуватиме основою для екологічних оцінок діяльності тепло- і електрогенерувальних підприємств, знаходження технічних способів і проектування технологічних рішень, спрямованих на зниження вмісту арсену та ртуті у продуктах і відходах вуглезабагачення.

Висновки. На основі отриманих результатів статистичного оброблення геохімічної інформації й аналізу побудованих карт ізоконцентрат та градієнтів арсену і ртуті й карт регіональної складової вмісту цих елементів можна сформулювати такі висновки:

1. Виявлено генетичний зв'язок підвищених концентрацій арсену і ртуті у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна" з тектонічними порушеннями субширотного напрямку, які є апофізами Центрального насуву і пов'язаною з ними зоною підвищеної тріщинуватості. Причому локалізація аномальної зони вмісту ртуті та арсену, а також їх максимальних градієнтів саме в зоні підвищеної тріщинуватості свідчить, що субширотні розривні порушення служили транзитним каналом, а зона підвищеної тріщинуватості відіграла контролювальну роль в накопиченні цих елементів.

2. Опосередкованим і прямим шляхом вперше доведено наявність арсену і ртуті в органічній складовій вугілля розглянутого пласта. Об-

числено середній вміст цих елементів, що становить для арсену 9,32 г/т, для ртуті — 0,17 г/т.

3. Виявлено, що у фракціях вугілля пласта щільністю 1,3—1,8 г/см³ істотну роль в концентрації арсену та ртуті переважно грають алюмосилікатна і карбонатна складові мінеральної частини вугілля, а для фракції щільністю 1,8 г/см³ і вище, що особливо проявляється у фракції щільністю >2,2 г/см³, головну роль в накопиченні цих елементів відіграє саме сульфідна частина мінеральної складової вугілля. Висока концентрація розглянутих елементів у вугіллі фракцій великої щільності буде сприяти до їх накопичення у відходах гравітаційного збагачення, що може призвести до істотного перевищування в них ГДК цих елементів.

4. Результати аналізу цілеспрямовано відібраних проб сульфідної, силікатної і карбонатних фракцій з неорганічною складовою вугільного пласта і сингенетичного, і епігенетичного походження, переконливо свідчать про переважно епігенетичний характер накопичення арсену і ртуті.

5. Арсен і ртуть у вугільному пласті k_5 поля шахти "Капітальна" формують геохімічну асоціацію, що має парагенетичний характер, який обумовлено не тільки їх подібними геохімічними особливостями, але і спільністю їх переважно епігенетичного походження, так і спільністю речовини, що їх концентрує у вугільному пласті.

Перспективи подальшого вивчення арсену і ртуті та інших токсичних й потенційно токсичних елементів у вугіллі Донбасу полягають у дослідженні розповсюдження цих елементів у вугіллі пластів з іншими ступенями вуглефікації з метою встановлення особливостей їх накопичення, що сприятиме розробленню способів та методів визначення як їхньої наявності, так і прогнозу технологічних параметрів вугілля та мінливості тріщинуватості вугільних пластів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Беляев В.К., Педаш Е.Т., Ко Н.А. Малые элементы в углях и вмещающих породах Шубаркольского месторождения. *Разведка и охрана недр*. 1989. № 11. С. 12—16.
2. Бучинська І., Лазар Г., Савчинський Л., Шевчук О. Умови утворення вугілля пласта n_8 Львівсько-Волинського басейну за геохімічними даними. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2013. Вип. 1—2 (162—163). С. 32—41.
3. Гороя Н.А. Кадастр токсичности продуктов добычи и отходов переработки антрацитов шахтопластов и шахт Донбасса. *Сб. науч. тр. Донбас. горно-металлург. ин-та*. 1999. 9. С. 10—14.
4. Гороя Н.А. Токсичные элементы в горной массе, антрацитах и золе антрацитов Донбасса. *Наук. вісн. Нац. гірничої акад. України*, 1999. 3. С. 31—33.
5. Горовой А.Ф., Гороя Н.А. Оценка токсичности продуктов добычи и отходов переработки антрацитов Донбасса. *Уголь Украины*. 1997. 12. С. 38—39.

6. Дворников А.Г. Новые данные о генезисе ореолов ртути в углях Донбасса. *Докл. АН СССР*. 1981. **256**, № 6. С. 1478—1480.
7. Дворников А.Г., Кирикилици С.И. Ртутоносность углей Донецкого бассейна. Москва: Недра, 1987. 155 с.
8. Дворников О.Г. До питання про розподіл ртуті в антрацитах Боково-Хрустальської котловини (Донбас). *Допов. АН УРСР. Сер. Б*. 1967. **29**, № 4. С. 293—298.
9. Инструкция по изучению токсичных компонентов при разведке угольных и сланцевых месторождений. Отв. исп. В.Р. Клер. Москва: АН СССР, Ин-т литосферы, 1982. 84 с.
10. Ішков В.В., Козій Є.С. Особливості розподілу токсичних і потенційно токсичних елементів в основних вугільних пластах по розрізу Красноармійського геолого-промислового району Донбасу. *II Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених, аспірантів і студентів "Проблеми розвитку гірничопромислових районів"*. ДонНТУ, 30 жовт. 2019 р. Покровськ, 2019. С. 3—14.
11. Ішков В.В., Козій Є.С. Про розподіл токсичних і потенційно токсичних елементів у вугіллі пласта C_7^H шахти "Павлоградська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Вісн. Київ. нац. ун-ту. Геологія*. 2017. **79** (4). С. 59—66. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.79.09>
12. Ішков В.В., Козій Є.С. Про розподіл токсичних і потенційно токсичних елементів у вугіллі пласта C_7^H шахти "Павлоградська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Восьма Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих учених "Наукова весна"*. НТУ "Дніпровська політехніка" 26—27 квіт. 2017 р. Дніпро, 2017. С. 2—3.
13. Ішков В.В., Козій Є.С. Деякі особливості розподілу берилію у вугільному пласті k_5 шахти "Капітальна" Красноармійського геолого-промислового району Донбасу. *Вісн. Одеськ. нац. ун-ту. Сер. Географ. та геол. науки*. 2020. **25**, № 1(36). С. 214—227. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.1\(36\).205180](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.1(36).205180)
14. Ішков В.В., Козій Є.С. Про розподіл токсичних і потенційно токсичних елементів у вугіллі пласта C_{10}^B шахти "Дніпровська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Донбасу. *Зб. наук. пр. "Геотехнічна механіка"*. 2017. Вип. 133. С. 213—227.
15. Ішков В.В., Козій Є.С. Новые данные о распределении токсичных и потенциально токсичных элементов в угле пласта C_6^H шахты "Терновская" Павлоград-Петропавловского геолого-промышленного района. *Зб. наук. пр. Нац. гірн. ун-ту*. 2013. № 41. С. 201—208.
16. Ішков В.В., Козій Є.С. О распределении As, Hg, Be, F и Mn в угле пласта C_4 шахты "Самарская" Павлоград-Петропавловского геолого-промышленного района. *Матеріали IV Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених "Молодь: наука та інновації"*, (Дніпро 6—7 груд. 2016 р.). Дніпро: НТУ "Дніпровська політехніка", 2016. **8**. С. 12—13.
17. Ішков В.В., Чернобук А.И., Михальчонок Д.Я. О распределении бериллия, фтора, ванадия, свинца и хрома в продуктах и отходах обогащения Добропольской ЦОФ. *Наук. вісн. Нац. гірн. акад. України*. 2001. № 4. С. 89—90.
18. Ішков В.В., Чернобук А.И., Дворецкий В.В. О распределении бериллия, фтора, ванадия, свинца и хрома в продуктах и отходах обогащения Краснолиманской ЦОФ. *Наук. вісн. Нац. гірн. акад. України*. 2001. № 5. С. 84—86.
19. Козій Є.С., Ішков В.В. Класифікація вугілля основних робочих пластів Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району по вмісту токсичних і потенційно токсичних елементів. *Зб. наук. пр. "Геотехнічна механіка"*. 2017. № 136. С. 74—86.
20. Козій Є.С. Миш'як, берилій, фтор і ртуть у вугіллі пласта C_8^B шахти "Дніпровська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Вісн. Дніпроп. ун-ту. Геол., географ.* 2018. **26** (1). С. 113—120. <https://doi.org/10.15421/111812>
21. Козій Є.С., Ішков В.В. Особливості розподілу токсичних і потенційно токсичних елементів в основних вугільних пластах по розрізу Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Донбасу. *Форум гірників-2018: Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. 10—13 жовт. 2018 р.* Дніпро: Нац. гірн. ун-т, 2018. С. 194—203. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/153644> (дата звернення 16.03.2021).
22. Козій Є.С. Особливості розподілу токсичних і потенційно токсичних елементів у вугіллі пласта C_{10}^B шахти "Сташкова" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Зб. наук. пр. "Геотехнічна механіка"*. 2017. № 132. С. 157—172.
23. Козій Є.С., Ішков В.В. Розподіл токсичних елементів по пласту C_8^B шахти Західно-Донбаська Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Форум гірників-2017: Матеріали міжнар. конф., 4—7 жовт. 2017 р.* Дніпро: Нац. гірн. ун-т, 2017. С. 265—275. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/150746> (дата звернення 16.03.2021).
24. Козій Є.С. Токсичні та потенційно токсичні елементи у вугільних пластах Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району: автореф. дис. ... канд. геол. наук. НАН України. Ін-т геол. наук. Київ, 2019. 25 с.
25. Кулиненко О.Р., Барна Т.В. Ассоциация "малых" элементов в палеозойских углях Украины и геохимическая типизация бассейнов. *Геол. журн.* 1985. **45**, № 6. С. 80—84.
26. Мейтов Е.С. Металлоносность углей. *Угольная база России. Т. 4. Угольные месторождения Восточной Сибири (Тунгусский, Таймырский, бассейны, месторождения Забайкалья)*. Москва: ЗАО "Геоинформцентр", 2001. С. 293—301.
27. Про оцінку впливу на довкілля. Закон України від 23.05.2017 року № 2059-VIII. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text> (дата звернення 16.03.2021).

28. Сауков А.А. Геохимия ртути. Пл. ред. А.Е. Ферсман. Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1946. 129 с. (*Тр. Ин-та геол. наук АН СССР*. Вып. 78, Сер. № 17).
29. Топливо твердое. Методы определения мышьяка. ГОСТ 10478-93. Москва: Изд-во стандартов, 1993. 13 с.
30. Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Метод отбора пластовых проб. ГОСТ 9815-75. Москва: Изд-во стандартов, 1975. 8 с.
31. Хайретдинов И.А. К вопросу о газовых ореолах ртути. *Геохимия*. 1971. № 6. С. 668—683.
32. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 655 с.
33. Belkin H.E., Zheng B.S., Zhou D.X., Finkelman R.B. Preliminary results on the geochemistry and mineralogy of arsenic in mineralized coals from endemic arsenosis areas in Guizhou Province, China. *Proc. of the 14th Annual Int. Pittsburgh Coal Conf. and Workshop (Beijing, China, 1997, Sept. 23—27)*. CD-ROM (Univ. of Pittsburgh), 1997. P. 1—20.
34. Block C., Dams R. Inorganic composition of Belgian coals and coal ashes. *Environ. Sci. Technol.* 1975. **9**, № 2. P. 146—150. RN:6184351
35. Clark P.J., Zingaro R.A., Irgolic K.J., McGinley N.N. Arsenic and selenium in Texas lignite. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 1980. **7**, № 4. P. 295—314. <https://doi.org/10.1080/03067318008071492>
36. Coleman S.L., Bragg L.J. Distribution and mode of occurrence of arsenic in coal. Recent Advances in Coal Geochemistry. Eds. L.L. Chyi, C.-L. Chou. 1990. P. 13—26. (*Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* № 248).
37. Ding Z., Zheng B., Zhang J. et al. Geological and geochemical characteristics of high arsenic coals from endemic arsenosis areas in southwestern Guizhou Province, China. *Appl. Geochem.* 2001. **16**. P. 1353—1360.
38. Eskenazy G. Geochemistry of arsenic and antimony in Bulgarian coals. *Chem. Geol.* 1995. **119**, № 1. P. 239—254. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00091-L](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00091-L)
39. Feng X., Hong Y. Modes of occurrence of mercury in coals from Guizhou, People's Republic of China. *Fuel*, 1999. **78**, Iss. 10. P. 1181—1188.
40. Finkelman R.B. *Modes of occurrence of trace elements in coal*. Ph.D. Dissertation. College Park: Dept. Chem., Univ. of Mariland, 1980. 302 p.
41. Finkelman R., Belkin H.E., Zheng B. Health impacts of domestic coal use in China. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 1999. **96**, № 3. P. 3427—3431.
42. Finkelman R.B., Dulong F.T., Stanton R.W., Cecil C.B. Minerals in Pennsylvania coal. *Geology*. 1979. **10**. № 5. P. 2—5 (U.S. Geological Survey, Reston, VA 22092).
43. Georgakopoulos A., Fernandez-Turiel J.L., Filippides A. et al. Trace element contents of the Lava xylite/lignite and Ptolemais lignite deposits, Macedonia County, Greece. Coal Science. Eds. J.A. Pajares, J.M.D. Tascon. *Proc. 8th Int. Conf. Coal Sci. (Oviedo, Sept. 10—15, 1995)*. Amsterdam: Elsevier, 1995. Vol. 1. P. 163—166.
44. Goodarzi F. Elemental concentrations in Canadian coals. 2. Byron Creek collieries, British Columbia. *Fuel*. 1987. **66**, № 2. P. 250—254.
45. Hart B.R., Powell M.A., Sahu K.C. et al. Mineralogy and geochemistry of coals from the Gevra mine, Korba, Madhya Pradesh, India II Coal Science. Eds. J.A. Pajares, J.M.D. Tascyn. Amsterdam: Elsevier, 1995. P. 155—158. (8th ICCS Proc. Vol. II).
46. Kozar M.A., Ishkov V.V., Kozii Ye.S., Pashchenko P.S. New data about the distribution of nickel, lead and chromium in the coal seams of the Donetsk-Makiivka geological and industrial district of the Donbas. *J. Geol. Geograph. Geoecology*. 2020. **29**(4). P. 722—730. <https://doi.org/10.15421/112065>
47. Zhang J.Y., Ren D.Y., Xu D.W. Distribution of arsenic and mercury in Triassic coals from Longtoushan Syncline, Southwestern Guizhou. P.R. China. *Prospects for Coal Science in 21st Century*. Eds. B.Q. Li, Z. Liu. Shanxi: Sci. Technol. Press, 1999. P. 153—156.

Надійшла 17.03.2021

REFERENCES

1. Beliaev, V.K., Pedash, E.T. and Ko, N.A. (1989), *Prospect and protection of mineral resources*, No. 11, Moscow, RU, pp. 12-16 [in Russian].
2. Buchynska, I., Lazar, H., Savchynskiy, L. and Shevchuk, O. (2013), *Geology and geochemistry of combustible minerals*, Вып. 1-2 (162-163), UA, pp. 32-41 [in Ukrainian].
3. Horovaya, N.A. (1999), *Sb. Nauch. Tr. Donbas. Horno-Metallurh. Inst-ta*, Vol. 9, Alchevsk, UA, pp. 10-14 [in Russian].
4. Horovaya, N.A. (1999), *Nauk. Visn. Nats. Hirnychoyi Akad. Ukrayiny*, Vol. 3, Dnipropetrovsk, UA, pp. 31-33 [in Russian].
5. Horovoy, A.F. and Horovaya, N.A. (1997), *Ugol Ukrainy*, Vol. 12, Kyiv, UA, pp. 38-39 [in Russian].
6. Dvornikov, O.G. (1981), *Dokl. AN SSSR*, Vol. 256, No. 6, RU, pp. 1478-1480 [in Russian].
7. Dvornikov, O.G. and Kyrykylitsa, S.I. (1987), *Mercury content of the Donetsk basin coals*, Nedra, Moscow, RU, 155 p. [in Russian].
8. Dvornikov, O.G. (1967), *Dopov. AN UkrRSR, Ser. B*, Vol. 29, No. 4, Kyiv, UA, pp. 293-298 [in Ukrainian].
9. Kler, V.R. (1982), *Instructions for the study of toxic components in the exploration of coal and shale deposits*, Institute of the lithosphere AS USSR, Moscow, RU, 84 p. [in Russian].

10. Ishkov, V.V. and Kozii, Ye.S. (2019), *Int. Sci. and Techn. Conf. students, graduate students and young scientists "Problems of Development of Mining Area"*, DonNTU, Octob. 30, 2019, Pokrovsk, UA, pp. 3-14 [in Ukrainian].
11. Ishkov, V.V. and Kozii, E.S. (2017), *Visn. Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv, Geology*, Vol. 79(4), Kyiv, UA, pp. 59-66 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.79.09>
12. Ishkov, V.V. and Kozii, E.S. (2017), *8th All-Ukr. Sci. and techn. Conf. students, graduate students and young scientists "Scientific Spring" (Nat. Techn. Univ. "Dnipro Polytechnic", April 26-27, 2017)*, Dnipro, pp. 2-3 [in Ukrainian].
13. Ishkov, V.V. and Kozii, Ye.S. (2020), *Odesa Nat. Univ., Ser. Geography and Geol.*, Vol. 25, No. 1 (36), UA, pp. 214-227 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.1\(36\),205180](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.1(36),205180)
14. Ishkov, V.V. and Kozii, E.S. (2017), *The Coll. Sci. Papers "Geo-Technical Mechanics"*, Iss. 133, Dnipro, UA, pp. 213-227 [in Ukrainian].
15. Ishkov, V.V. and Kozii, E.S. (2013), *Coll. Sci. Works of Nat. Mining. Univ.*, No. 41, Dnipro, UA, pp. 201-208 [in Russian]
16. Ishkov, V.V. and Kozii, E.S. (2016), *Materialy IV Vseukr. nauk.-tekhn. konf. studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh "Molod': nauka ta innovatsiyi"*, (Nat. Techn. Univ. "Dnipro Polytechnic", Decem. 6-7, 2016), Vol. 8, Dnipro, UA, pp. 12-13 [in Russian].
17. Ishkov, V.V., Chernobuk, A.I. and Mihalchonok, D.Ya. (2001), *Sci. Bull. Nat. Mining Acad. Ukr.*, No. 4, Дніпро, UA, pp. 89-90 [in Russian].
18. Ishkov, V.V., Chernobuk, A.I. and Dvoretzkiy, V.V. (2001), *Sci. Bull. Nat. Mining Acad. Ukr.*, No. 5, Dnipro, UA, pp. 84-86 [in Russian].
19. Kozii, E.S. and Ishkov, V.V. (2017), *The Coll. Sci. Papers "Geo-Technical Mechanics"*, No. 136, Dnipro, UA, pp. 74-86 [in Ukrainian].
20. Kozii, E.S. (2018), *Dniprop. Univer. Bull., Geol., geography*, No. 26(1), Dnipro, UA, pp. 113-120 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15421/111812>
21. Kozii, E.S. and Ishkov, V.V. (2018), *Int. Sci. and Techn. Conf. "Forum of Mining Engineers-2018"*, Nats. Girnych. Univ., Oct. 10-13, Dnipro, UA, pp. 194-203 [in Ukrainian]. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/153644>
22. Kozii, E.S. (2017), *The Coll. of Sci. Papers "Geo-Technical Mechanics"*, No. 132, Dnipro, UA, pp. 157-172 [in Ukrainian].
23. Kozii, E.S. and Ishkov, V.V. (2017), *Int. Sci. and Techn. Conf. "Forum of Mining Engineers-2017"*, Nats. Girnych. Univ., Oct. 4-7, Dnipro, UA, pp. 265-275 [in Ukrainian]. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/150746>
24. Kozii, Ye.S. (2019), *Toksychni ta potentsiyno toksychni elementy u vuhil'nykh plastakh Pavlohrads'ko-Petropavlivs'koho heoloho-promysloвого rayonu: Avtoref. dys. kand. heol. nauk, NAN Ukrayiny, In-t heol. nauk, Kyiv, 2019. 25 p.* [in Ukrainian].
25. Kulinenko, O.R. and Barna, T.V. (1985), *Geol. Journ.*, Vol. 45, No. 6, Kyiv, UA, pp. 80-84 [in Russian].
26. Meitov, E.S. (2001), *Metal content of coals. Coal base of Russia*, Vol. 4, Closed Joint Stock Company "Geoinformcenter", Moscow, RU, pp. 293-301 [in Russian].
27. (2017) *Pro otsinku vplyvu na dovkillya. Law of Ukraine*, URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text> (Last accessed 16.03.2020).
28. Saukov, A.A. (1946), *Mercury geochemistry*, in Fersman, A.E. (ch. ed.), Acad. Sci. USSR press, Leningrad, PU, 129 p. (Tr. Inst. of Geol. Sci., Iss. 78, Ser. No. 17) [in Russian].
29. (1993) *Solid fuel. Methods for determination of arsenic*. GOST 10478-93, Publ. House of standards, Moscow, RU, 13 p. [in Russian].
30. (1975) *Brown coal, hard coal, anthracite and combustible shales. Method for sampling of seam samples. Method for sampling of seam samples*. GOST 9815-75, Publ. House of standards, Moscow, RU, 8 p. [in Russian].
31. Khairetdinov, I.A. (1971), *Geochemistry*, No. 6, RU, pp. 668-683 [in Russian].
32. Yudovich, Ya.E. and Ketris, M.P. (2005), *Toksichnye elementy-primesi v iskopayemykh uglyakh*, Ural. Otd. RAN, Ekaterinburg, RU, 655 p. [in Russian].
33. Belkin, H.E., Zheng, B.S., Zhou, D.X. and Finkelman, R.B. (1997), *Proc. of 14th Annual Int. Pittsburgh Coal Conf. and Workshop (Beijing, China, 1997, Sept. 23-27)*, CD-ROM (Univ. of Pittsburgh), 1997, pp. 1-20.
34. Block, C. and Dams, R. (1975), *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 9, No. 2. pp. 146-150. RN:6184351
35. Clark, P.J., Zingaro, R.A., Irgolic, K.J. and McGinley, N.N. (1980), *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, Vol. 7, No. 4, pp. 295-314. <https://doi.org/10.1080/03067318008071492>
36. Coleman, S.L. and Bragg, L.J. (1990), *Recent Advances in Coal Geochemistry*, in Chyi, L.L. and Chou, C.-L. (eds), pp. 13-26 (*Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* No. 248).
37. Ding, Z., Zheng, B., Zhang, J. et al. (2001), *Appl. Geochem.*, Vol. 16. pp. 1353-1360.
38. Eskenazy, G. (1995), *Chem. Geol.*, Vol. 119, No. 1, pp. 239-254.
39. Feng, X. and Hong, Y. (1999), *Fuel*, Vol. 78, No. 10, pp. 1181-1188.
40. Finkelman, R.B. (1980), *Modes of occurrence of trace elements in coal*, Ph.D. dissert., College Park: Dept. Chem., Univ. of Mariland, 302 p.
41. Finkelman, R., Belkin, H.E. and Zheng, B. (1999), *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, Vol. 96, No. 3. pp. 3427-3431.
42. Finkelman, R.B., Dulong, F.T., Stanton, R.W. and Cecil, C.B. (1979), *Geology*, Vol. 10, No. 5, pp. 2-5 (U.S. Geol. Sirvey, Reston, VA 22092).

43. Georgakopoulos, A., Fernandez-Turiel, J.L., Filippides, A. et al. (1995), *Coal Science*, in Pajares, J.A. and Tascyn, J.M.D. (eds), *Proc. 8th Int. Conf. Coal Sci.*, Vol. 1, Elsevier, Amsterdam, pp. 163-166.
44. Goodarzi, F. (1987), *Fuel*, Vol. 66, No. 2, pp. 250-254.
45. Hart, B.R., Powell, M.A., Sahu, K.C. et al. (1995), *India II Coal Science*, in Pajares, J.A. and Tascyn, J.M.D. (eds), *8th ICCS Proc.*, Vol. II, Elsevier, Amsterdam, pp. 155-158.
46. Kozar, M.A., Ishkov, V.V., Kozii, Ye.S. and Pashchenko, P.S. (2020), *J. Geol. Geograph. Geoecology*, Vol. 29(4), pp. 722-730. <https://doi.org/10.15421/112065>
47. Zhang, J.Y., Ren, D.Y. and Xu, D.W. (1999), *China. Prospects for Coal Science in 21st Century*, in Li, B.Q. and Liu, Z. (eds), Sci. Technol. Press, Shanxi, pp. 153-156.

Received 17.03.2021

V.V. Ishkov, PhD (Geology and Mineralogy), Assistant Professor
Dnipro University of Technology
49005, Dnipro, Ukraine, Dmytro Yavornytskyi Ave., 19
E-mail: ishwishw37@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3987-208X>
Ye.S. Kozii, PhD (Geology), Deputy Director
Dnipro University of Technology
49005, Dnipro, Ukraine, Dmytro Yavornytskyi Ave., 19
E-mail: kozii.es@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2167-6224>

DISTRIBUTION OF ARSENE AND MERCURY IN THE COAL SEAM k_5 OF THE KAPITALNA MINE, DONBAS

The aim of the research is to establish the characteristics of the As and Hg distribution, which belong to the main toxic elements of coal, in the coal seam k_5 of the minefield Kapitalna (Krasnoarmiyskiy geological and industrial area of Donbas) and their main genetic factors. The applied methods include sampling coal from mine workings and from core-samples duplicates of wells from 1981 to 2014; identification of the inorganic part of the coal seam, macroscopically diagnosed by standard mineralogical methods as sulfide, silicate and carbonate fractions. According to textural and structural features, they are divided into groups of syngenetic and epigenetic origin; the mineral composition of these two groups was determined by optical microscopy using MIN-8 and MBS-9 microscopes and by X-ray diffraction analysis. Fractional analysis of the density of coal from duplicates of the original samples was carried out to identify the substance of the inorganic part of the coal seam; Arsenic and Hg contents were determined by atomic absorption analysis in the substance of all initial and final samples; normalization of all values of Hg and As concentrations and technological parameters of coal; statistical processing of all geochemical information using Excel 2016 and Statistica 11.0, which included correlation and regression analysis; calculation of the coefficients of affinity of Hg and As with organic matter, the coefficients of the reduced concentration of the investigated elements, the coefficients of the reduced extraction of these elements in the fraction of different densities; construction of maps of normalized isoconcentrates; changes in the regional component of normalized content and gradient of normalized content were performed using the program Surfer 11. We found a genetic link between high concentrations of As and Hg in the coal seam k_5 of the minefield Kapitalna with tectonic features, the Central overthrust and associated zones of increased fracturing. The accumulation of As and Hg in the coal seam k_5 of the minefield Kapitalna, bound to the organic component of the coal seam, is epigenetic. The practical significance of the work is that their high concentration in the high-density fractions of coal will lead to their gravitational accumulation in the waste.

Keywords: arsenic, mercury, toxic elements, geological and industrial area, correlation coefficient, linear regression equation, statistical relationship.