

УДК 553.048

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.11>

Микола БУРЛУЦЬКИЙ, канд. геол. наук

ORCID ID: 0009-0000-6718-3006

e-mail: Nikolay2205@i.ua

Державна служба геології та надр України, Київ, Україна

Станіслав ЛИТВИНЮК, канд. геол. наук

ORCID ID: 0000-0003-3763-2100

e-mail: lytvyniuksf@gmail.com

Державна комісія України по запасах корисних копалин, Київ, Україна

ГЕРМАНІЙ ЯК ЕЛЕМЕНТ КРИТИЧНОЇ СИРОВИНИ. БУРОВУГІЛЬНІ РОДОВИЩА ЗАКАРПАТТЯ ЯК ДЖЕРЕЛО ДЛЯ ОТРИМАННЯ ГЕРМАНІЮ В УКРАЇНІ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Визначено поняття критичної сировини, з врахуванням визначень, що застосовуються у США та Європейському Союзі. Надано основні етапи становлення нормативної бази та вимоги США, ЄС щодо критичної сировини. Розглянуто хронологію щодо зміни кількості корисних копалин, які є складовою частиною критичної мінеральної сировини.

Україна є державою з потужною мінерально-сировинною базою, багатства надр якої зумовлені особливостями геологічної будови її території. Україна володіє потужним ресурсним потенціалом і може стати одним із провідних світових виробників деяких видів корисних копалин, у тому числі такої важливої сировини, як берилій, германій та графіт. У нашій державі наявні близько 22 елементів корисних копалин, які належать до критичних і містяться в переліку критичних для ЄС.

Проведено аналіз та перспективи використання різних методів та сучасних технологій вилучення германію як одного з елементів критичної сировини. Розглянуто можливість щодо використання сучасних методів вилучення в Україні, зокрема на прикладі буровугільних родовищ Закарпаття.

В Україні саме буровугільні родовища Закарпаття мають потенціал стати важливим джерелом для видобутку рідкісних (рідкоземельних) елементів, у тому числі і германію. Опрацьовано можливість залучення сучасних світових технологій, які б сприяли видобутку бурого вугілля в Закарпатті з дотриманням усіх існуючих екологічних та соціально-екологічних вимог чинного законодавства.

Асоціація германію з рідкісними (рідкоземельними) елементами у цих родовищах може підвищити економічну цінність їх комплексного використання, оскільки існують закордонні технології, що дають змогу одночасно вилучати кілька критичних елементів з одного джерела.

Пропонується впровадження технологій вилуговування та флотації для підвищення ефективності видобутку. Це сприятиме економічному зростанню регіону та відповідатиме світовим вимогам щодо критичної сировини.

Вказано на необхідність запровадження в Україні Стратегії видобутку рідкоземельних та рідкісних металів для покращення економічної ситуації в гірничодобувній промисловості. А саме, необхідності комплексного відпрацювання родовищ бурого вугілля, з його використанням як палива, так як джерела рідкоземельних металів, необхідних для сучасних технологій у промисловості.

Ключові слова: критична мінеральна сировина, германій, буровугільні родовища, рідкоземельні та рідкісні метали, вилучення германію.

Вступ

Останнім часом актуального значення у світі набувають проблеми сталого економічного розвитку, які безпосередньо пов'язані з різними причинами. Не останню роль у розв'язанні цієї проблеми відіграє можливість доступу країн до мінеральної сировини, передусім до тієї, яка має стратегічне значення.

У 2024 р. набрав чинності Закон ЄС про критичну мінеральну сировину (далі – КМС), спрямований на забезпечення диверсифікованого, безпечного та сталого постачання важливих сировинних матеріалів для промисловості ЄС.

Гарантований доступ до них є необхідним для стратегічних секторів, включаючи зелені технології, цифровізацію, оборонну й аерокосмічну галузі. Зазначений Закон зміцнює внутрішні потужності та ланцюжки постачання критично важливих сировинних матеріалів у ЄС, продовжуючи при цьому зусилля з їх диверсифікації.

У кожній з країн поняття КМС визначаються виходячи з вимог національного законодавства, умов кон'юнктури ринку, галузевої методики оцінки, можливості заміни на підставі ідентичності їх властивостей, відповідністю технологіям чистої енергії і т. ін.

Методологія визначення поняття КМС почали розробляти ще у 2008 р. у США. Вона побудована на трьох ознаках: 1) можливість заміщення іншим видом сировини; 2) функціональна незамінність; 3) ризик поставок.

Це фактично ті маркери, які дають змогу ту чи іншу корисну копалину відносити до переліку КМС (Баряцька, 2020).

Базові поняття та переліки КМС змінювалися у часі та були пов'язані з істотними змінами геополітичних і технологічних обставин. Розвинені країни мають різні підходи щодо формування переліку КМС, але по всьому світу головним її "споживачем" є "зелені" енергетичні технології (атомна, сонячна, вітрова та водна енергетика) та зростаюче виробництво електричних транспортних засобів.

Так, Міністерство енергетики США в липні 2023 р. видало звіт з оцінки КМС (Critical Materials Assessment, 2023). У звіті зазначається, що протягом понад десяти років Міністерство фінансувало фундаментальні та прикладні дослідження та розробки науково-дослідних робіт, пов'язаних з критично важливими матеріалами, щоб вирішити науково-технічні проблеми, які лежать в основі вразливості ланцюга постачання. Ці інвестиції стали можливими завдяки першій стратегії щодо КМС у 2010 р.

Оцінка критичних матеріалів 2023 р. дала змогу Міністерству енергетики США визначити пріоритети для інвестицій через дослідження, розробку та впровадження для критичних матеріалів, продовжуючи прогрес у науково-технічних інноваціях у поєднанні з розширенням фокусом на зниженні ризиків і розширенні технологій комерціалізації для створення та трансформації внутрішніх ланцюгів постачання.

У ЄС питання КМС, зокрема германію, також розглядається в контексті переходу до зеленої економіки, де цей елемент відіграє важливу роль у виробництві сонячних панелей та інших технологій. Європейська Комісія починаючи з 2011 р. складає та систематично переглядає свій перелік CRM (Mykhailov et al., 2023).

У 2017 р. було розроблено директивний документ, який містить керівні принципи визначення та методик оцінки КМС для ЄС. Відповідно до цього методичного документу у 2023 р. розроблений та опублікований фінальний звіт з дослідження КМС для ЄС (Guidelines, 2017). Того ж року вийшов документ Європейської Комісії (Methodology..., 2017). Цей документ включає критерії, підходи і методології для визначення критичних матеріалів, які мають життєве важливе значення для індустрій ЄС, з урахуванням економічної значущості та ризику постачання. Документ підкреслює важливість стійкого постачання германію та інших критичних елементів, оскільки їх відсутність може загальмувати розробку стратегічних технологій і цифрового майбутнього Європи.

На основі даних ЄС про переліки КМС понад 10 років зберігається стійка тенденція до розширення переліку КМС Європейського Союзу, який за цей час збільшився з 16 до 34. Загалом переліки КМС є досить показовими з погляду розвитку (або стимулювання) певних напрямів економіки та промисловості для даного регіону (Grohol et al., 2023).

Україна є державою з потужною мінерально-сировинною базою, багатства надр якої зумовлені особливостями геологічної будови її території. Водночас наша країна є одним із провідних світових виробників деяких видів корисних копалин, у тому числі такої важливої сировини, як марганець, титан і графіт. Хоча переліки КМС США, ЄС і України мають досить багато спільних видів сировини, український перелік має суттєві відмінності (наприклад, має 8 власних видів). Нині наші стратегічні корисні копалини більш подібні до переліку КМС США, ніж ЄС, що є досить нелогічним. Це може бути пов'язане не лише з різним розвитком економіки та промисловості, але й з методиками визначення критичності (Литвинюк, & Баряцька, 2024).

У нашій державі наявні близько 22 критичних корисних копалин, що містяться, зокрема, в переліку критичних для ЄС (Портфоліо..., 2023). У липні 2021 р. Україна та Європейський Союз уклали Меморандум про стратегічне партнерство щодо сировинних ресурсів. Крім того, у 2024 р. Україна стала членом Minerals Security Partnership (MSP) Forum. Завданням цього членства є налагодження партнерства з країнами, багатими на ресурси, і країнами з високим попитом на ці ресурси, для вивчення взаємовигідних проєктів. Проте в Україні поняття "критична мінеральна сировина" або "критичні корисні копалини" до цього часу законодавством не визначено.

Метою роботи є аналіз та перспективи використання різних методів і сучасних технологій для вилучення германію як одного з елементів критичної сировини.

В Україні саме буровугільні родовища Закарпаття мають ресурсний потенціал стати важливим джерелом для видобутку рідкісних (рідкоземельних) елементів, зокрема і германію. Асоціація германію з рідкісними (рідкоземельними) елементами у родовищах такого геолого-промислового типу може підвищити їх економічну цінність та комплексність використання із застосуванням сучасних технологій.

Комплексна розробка зазначених родовищ включає два напрями: використання бурого вугілля як палива та вилучення цінних компонентів (германій та ін.) як з вугільної маси, так і з вугільної золи та летючих золовиносів.

Пропонується впровадження технологій вилучування та флотації для підвищення ефективності видобутку. Це сприятиме економічному зростанню регіону та відповідатиме світовим вимогам щодо критичної сировини.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Поняття КМС, методики та методології визначення її критичності, актуальні переліки та стратегії щодо КМС різних країн, зокрема і германію, визначена різними методичними та нормативними документами США, Європейського Союзу, Канади, Австралії (Australia's..., 2023; Canada and U.S..., 2020; Carrara et al., 2023; Hund et al., 2020).

Публікації останніх років із США та інших країн про вилучення германію з бурого вугілля показують активні дослідження в цій галузі (Shpirt et al., 2023; Vogel, Mieke, & Bertau, 2023; Rafique, & Chang, 2022). Інші публікації акцентують увагу на геохімічному аналізі розподілу германію в різних родовищах вугілля, а також на нових технологіях вилучення цього елемента (Luo et al., 2023; An et al., 2022; The Extraction..., 2024).

У дослідженнях останніх років використовують методи гравітаційного поділу, низькотемпературного спікання, хлоридного дистилювання та інші сучасні технології для максимізації вилучення германію та інших рідкісних елементів із залишків вугільного згоряння і золи. Ці дослідження допомагають оптимізувати процеси переробки й вилучення рідкісних елементів з вугілля, що стає дедалі важливішим через зростання попиту на критичні мінерали для сучасних технологій. Дослідження щодо вилучення рідкісноземельних елементів (РЗЕ) та германію з бурого вугілля (лігніту) зосереджені на таких темах, як використання залишкових продуктів вугільної промисловості для видобутку критичних мінералів.

Проблемам вилучення (отримання) та використання критичної сировини досліджувалися у працях вітчизняних фахівців (Шехунова, 2023; Бучинська та ін., 2023; Блайда та ін., 2011; Булат, & Баранов, 2021).

Результати

Германій як елемент критичної сировини. Одним із металів, що є критичним як для США, так і Європейського Союзу, є германій. Серед інших напівпровідникових матеріалів германій за своїми електричними властивостями поступається лише монокристалічному кремнію. Однак якість (чистота) кремнію повинна бути вищою (приблизно в 10 разів), ніж допускається для германію.

Імпорт металевого германію та діоксиду германію (із вмістом германію) у 2023 р. зріс приблизно на 20 % порівняно з 2022 р.

Китай продовжує залишатися провідним світовим виробником і експортером германію. У серпні уряд Китаю запровадив програму ліцензування експорту германію. Експортери повинні були подати заявку на експортну ліцензію для кожної партії германію, надавши уряду інформацію про закордонного покупця та кінцеве використання. Експорт металевого германію (коди експорту Китаю 8112.92.10 і 8112.99.10) за рік до вересня 2023 р. зріс на 34 % до 34 600 кілограмів порівняно з аналогічним періодом 2022 р.

Найбільше цей експорт був спрямований до Росії (21 %), Німеччини (19 %), Гонконгу (18 %), США (17 %), Бельгії (9 %) та Японії (8 %).

Ціни на металевий германій і діоксид германію (Європа, мінімальний вміст 99,999 %) зазвичай зростали між січнем і жовтнем: ціна на металевий германій зросла з 1150 до 1550 доларів за кілограм, а ціна на діоксид германію – з 725 до 940 доларів за кілограм.

Знаходження германію в природі. Слід розглядати питання комплексної розробки вугільних родовищ (зокрема, буровугільних родовищ Закарпаття), зважаючи на наявність у вугіллі крім, германію, ще цілого комплексу хімічних елементів (асоціації хімічних елементів), що належать до рідкоземельних та рідкісних металів, більшість з яких є на цей час критичною сировиною.

Германій часто трапляється у вугільних родовищах разом з іншими рідкоземельними та металевими елементами, такими як галій, ванадій, скандій і рідкоземельні елементи (лантаніди). Ці елементи можуть бути присутніми у вугільних пластах – у вигляді домішок у мінералах або у структурі органічної речовини. Їх асоціація пояснюється схожими геохімічними умовами утворення та концентрації в осадових басейнах:

1. *Галій* має тісний зв'язок із германієм і трапляється у вугіллі та вугільних золах як домішка. Використовується в напівпровідниках і сонячних батареях, як і германій.

2. *Ванадій* часто трапляється разом з германієм у вугільних родовищах і використовується у виробництві спеціальних сталей і каталізаторів.

3. *Скандій* та інші рідкоземельні елементи зазвичай трапляються у вугіллі через його здатність концентрувати різні метали в осадових породах.

У вугіллі часто присутні мікроелементи, які можуть формувати комплекси або взаємодіяти з іншими елементами та мінералами. Основні елементи, які часто трапляються в різних вугільних родовищах:

1. *Германій (Ge)*. Утворює сполуки з сіркою або присутній у вигляді оксидів у вугіллі. Германій також може бути пов'язаний з органічною речовиною.

2. *Сірка (S)*. Зустрічається в піритах (FeS_2), де також можуть бути включені мікроелементи, такі як германій.

3. *Арсен (As)*, *свинець (Pb)*, *цинк (Zn)*. Можуть асоціюватися з піритами або іншими сульфідними мінералами.

4. *Рідкісні елементи (наприклад, гафній, тантал, індій)*: Трапляються у вугільній золі як домішки або в органічній фазі.

Асоціація хімічних елементів з германієм у бурому вугіллі може варіюватися залежно від геологічних умов і регіону. Зазвичай германій асоціюється з такими елементами, як:

1. *Цинк (Zn)* – германій часто виявляється разом із цинком, оскільки його вилучення зазвичай відбувається як побічний продукт у процесі переробки цинкових руд.

2. *Стибій (Sb)* та *Арсен (As)* – ці елементи також можуть бути присутніми у вугіллі з германієм, зокрема, в умовах, де вугілля має високий вміст важких металів.

3. *Кремній (Si)* – германій трапляється у вугіллі у формі силікатів. Кремній може бути важливим компонентом для асоціації германію у вугіллі.

4. *Свинець (Pb)*, *Кадмій (Cd)* та *Мідь (Cu)* – вони можуть бути присутніми в низьких концентраціях разом із германієм у вугільних родовищах.

Деякі дослідження вказують, що германій утворює комплекси з кремнеземом та іншими металами у формах, таких як германати, що впливає на технології його вилучення з вугільної золи.

Кожен із цих елементів становить високий комерційний інтерес, оскільки вони використовуються в сучасних технологіях, зокрема у виробництві електроніки, сонячних панелей і магнітів.

Наявні ресурси германію зазвичай пов'язані з деякими цинковими і свинцево-цинково-мідними сульфідними рудами і родовищами бурого вугілля.

Асоціація германію із цими елементами у вугільних родовищах Закарпаття може підвищити економічну цінність комплексного використання цих родовищ, оскільки

існують технології, що дають змогу одночасно вилучати кілька критичних елементів з одного джерела.

Світове виробництво германію. Відомо, що германій вироблявся або комерційно перероблявся лише в кількох країнах, включаючи США, Бельгію, Канаду, Китай, Німеччину та Росію.

Китай є лідером з видобутку германію (родовища у Вулантузі та Лінцані). Дані щодо видобутку за останні роки показують, що Китай продовжує утримувати провідні позиції завдяки значним запасам германію у вугільних пластах.

Оскільки більшість виробників не повідомляють публічно про виробництво германію, глобальні дані про виробництво були обмеженими. Багаті на германій родовища, включаючи хвостосховища, які діяли або активно розроблялися, були у США, Китаї, Конго (Кіншаса) та Росії. Однак даних про запаси цих родовищ загалом не було.

Дані про запаси германію не надходили в широких звітах на рівні шахт чи країни, тому їх було важко кількісно визначити.

Наявні ресурси германію пов'язані з деякими цинковими і свинцево-цинково-мідними сульфідними рудами і родовищами бурого вугілля.

Нещодавні звіти включають графіки та таблиці, які показують світову динаміку видобутку германію. Наприклад, у доповіді Геологічної служби США можна знайти діаграми щодо виробництва та споживання германію в різних секторах, таких як оптоелектроніка та сонячна енергетика, що є важливими споживачами цього елемента (Mineral Commodity..., 2024).

Методи вилучення германію з вугілля. Основні методи вилучення германію з вугілля і вугільної золи включають різноманітні хімічні та термічні процеси. Наприклад, вугілля з високим вмістом германію (як у Китаї) проходить обробку з використанням кислотного вилугування та подальшого осадження з розчинів. У деяких випадках використовують комбінацію флотації та гравітаційного збагачення для підвищення концентрації германію.

Високі концентрації цього елемента часто зустрічаються у збагаченому вугіллі, такому як на вугільному родовищі Вулантуга в Китаї.

Германій присутній у бурому та кам'яному вугіллі в незначних концентраціях, але через його цінність розроблено кілька методів для вилучення цього елемента.

Основні методи вилучення германію з бурого та кам'яного вугілля включають:

1. *Гравітаційне збагачення.* Цей метод полягає у фізичному розділенні мінералів на основі різниці в їх густині. Для збагачення вугілля та вилучення германію іноді використовують методи важкосередовищного або відсаджувального збагачення. Проте цей метод може бути недостатньо ефективним через те, що германій здебільшого присутній у формі розсіяних сполук або домішок.

2. *Флотація.* Флотація полягає у відділенні часток вугілля з домішками германію на основі їх гідрофобності або гідрофільності. Для виділення германію додаються флотаційні реагенти, які вибірково захоплюють його сполуки.

3. *Гідрометалургія.* Гідрометалургійні методи включають вилугування германію з вугілля або золи після спалювання. Основні підходи:

- **кислотне вилугування:** для вилучення германію використовують різні кислоти, такі як сірчана або соляна. Це дає змогу розчинити германій, перетворюючи його в розчин для подальшого очищення;

- **лужне вилугування:** застосовується для виділення органічних компонентів та вилугування германію із золи вугілля за допомогою лужних реагентів, наприклад NaOH .

4. *Пірометалургія*. Цей метод включає спалювання вугілля, після чого германій концентрується в зольних залишках. Далі германій вилучають із золи за допомогою подальших хімічних операцій, таких як хлорування або сульфідизація.

5. *Біогідрометалургія*. Новий підхід до вилучення германію, що включає використання мікроорганізмів для розкладання вуглецевих і сірчаних сполук, що містять германій. Це перспективний метод, але він поки що не має широкого промислового застосування.

6. *Сублімація*. Це високотемпературний метод, за якого германій, наявний у вугіллі, сублімується (перетворюється в пароподібний стан) при високих температурах і потім конденсується з пари. Після цього він може бути очищений.

Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки (табл. 1), і вибір методу залежить від концентрації германію у вугіллі, економічної доцільності та екологічних вимог.

Ці методи ґрунтуються на різних фізичних процесах, а саме:

1. *Піроліз*. Термічна обробка вугілля при високих температурах без доступу кисню. Цей процес дає змогу виділити германій у вигляді пари, яка потім може бути конденсована.

2. *Газифікація*. Вугілля піддається частковому окисленню з утворенням синтез-газу (CO та H_2). Германій при цьому вилучається з летких продуктів та золи.

3. *Гідрометалургійні методи*. Включають вилуговування германію з вугільного попелу кислотами (найчастіше сірчаною або соляною кислотою). Отримані розчини обробляються для осадження германію у вигляді гідроксиду або сульфідів.

4. *Сорбційні методи*. Германій може бути вилучений з рідких фаз за допомогою спеціальних сорбентів. Цей метод дає змогу відокремити германій з відносно низькими енергетичними витратами.

5. *Плазмове збагачення*. Плазмові технології також можуть бути використані для вилучення германію з летких продуктів спалювання або газифікації вугілля.

Зазначені методи активно застосовуються в Китаї, Німеччині та Росії, оскільки ці країни мають значні запаси германію, який міститься у вугільних родовищах.

Таблиця 1

Основні методи вилучення германію: переваги та недоліки

Методи вилучення германію	Опис технології	Переваги	Недоліки
Хімічне вилучення	Використання кислот або лугів для розчинення германію	Висока ефективність вилучення	Витрати на хімікати та утворення відходів
Термохімічне оброблення	Нагрівання бурого вугілля з добавками для виділення германію	Можливість отримання концентрату	Висока енергоємність процесу
Біохімічне вилучення	Використання мікроорганізмів для біорозкладання вугілля та вилучення германію	Екологічно чистий процес	Низька швидкість процесу
Фізичне сортування	Виділення германієвих мінералів за допомогою механічних або фізичних методів	Простота і низька вартість	Низька ефективність

Станом на 2023 р. основними країнами, що займаються вилученням германію, включаючи видобуток з бурого вугілля, є Китай, Росія та Німеччина. Як вже зазначалось вище, дані про запаси багатьох багатих на германій родовищ (включаючи хвостосховища), які раніше активно розроблялися у США, Китаї, Конго (Кіншаса) та Росії, відсутні.

Німеччина має багатий досвід вилучення германію з бурого вугілля. Германій в основному вилучається з вугільної золи під час спалювання бурого вугілля. Наприклад, процеси екстракції германію в Луїзькому басейні (Lusatian Basin) є одними з найбільш вивчених. За даними одного з досліджень, вміст германію у вугіллі цього регіону може досягати 100 г/т.

Китай також активно досліджує вилучення германію та є світовим лідером з його виробництва з різних джерел, включаючи буре вугілля, зокрема з вугільних відходів та відкладів у провінції Юньнань.

США також досліджують можливості вилучення германію з вугільних відходів, зокрема з попелу після спалювання вугілля. Наприклад, у штаті Монтана були знайдені значні кількості германію у вугільних родовищах.

Ці результати підкреслюють потенціал бурого вугілля як сировини для вилучення критичних металів, таких як германій, та їх важливості для промисловості.

Протягом 2023 р. видобуток германію з вугілля здійснювався в кількох країнах, серед яких найактивніше це робили Китай, Росія та США. Більшість германію добувається як побічний продукт під час переробки цинку та вугілля. Проте детальні цифри відсоткового видобутку германію з вугілля за 2023 р. у відкритих джерелах не

публікуються широко, оскільки ці дані є частково комерційною інформацією.

Імпорт металевого германію та діоксиду германію (із вмістом германію), за оцінками, зріс приблизно на 20 % у 2023 р. порівняно з 2022 р. – до 38 000 кг. Імпорт тетрахлориду германію неможливо визначити кількісно за наявними даними торгівлі. Глобальні дані про виробництво та переробку германію були обмеженими, а доступні оцінки було важко перевірити.

Аналіз германієвості буровугільних родовищ та проявів Закарпаття здійснювався за результатами проведених пошуково-розвідувальних та випробувальних робіт протягом 50–80-х років ХХ ст.

Так, зокрема, за результатами робіт, проведених у 1960 р. Київським геологорозвідувальним трестом, було складено звіт про результати пошуково-випробувальних робіт на германій, виконаних Закарпатською геологорозвідувальною експедицією на території Станіславської та Закарпатської областей СРСР протягом 1958–1959 рр. та надано характеристику по 10 ділянках та вуглепройвах Закарпатської області (Левицький, 1960).

У звіті наведені результати по 2300 пробах спектрального аналізу та 100 пробах вугілля та порід, що вміщують вугілля. Водночас надаються відомості про спектрографічне визначення інших рідкісних та розсіяних елементів, що трапляються в золі вугілля та вмісних породах, зокрема берилію, галію, скандію, ітрію, ітербію, лантану.

За результатами спектрального аналізу подано деталізацію щодо 25 хімічних елементів. Така кількість була вибрана не випадково, адже відповідно до чинних на той час "Тимчасових вказівок щодо випробування і підрахунку запасів германію та інших рідкісних елементів у родовищах

вугілля" всі проби необхідно піддавати напівкількісному спектральному аналізу з обов'язковою деталізацією по 30 хімічних елементах. Оскільки п'ять елементів не виявлено в жодній з проб, до журналів спектрального аналізу не включені індій, кадмій, титан, рубідій та цезій.

Основні напрями робіт з питань вилучення германію з вугільних родовищ України, зокрема родовищ бурого вугілля Закарпаття, такі:

1. *Проведення подальших геологорозвідувальних робіт на буровугільних родовищах Закарпаття для пошуку найбільш перспективних на германій ділянок надр.* Вивчення умов їх залягання та можливості комплексного їх освоєння.

2. *Вибір сировини.* Германій в основному вилучається з вугільної золи під час спалювання бурого вугілля. Досліджені німецькі бурі вугілля, як перспективна сировина для вилучення германію, оскільки вони містять значні концентрації цього елемента (вміст германію у вугіллі Луцького басейну може досягати 100 г/т). Проте буре вугілля Закарпаття містить до 250–300 г/т вугільної маси, зокрема окремі ділянки Біганського родовища. Водночас вміст германію в золі останнього, досягає 1000 г/т.

3. *Процеси вилучення.* Розглянуті вище різні технологічні процеси, зокрема такі, як газифікація і піроліз, можуть бути використані для вилучення германію з бурого вугілля Закарпаття.

4. *Екологічні аспекти.* Повинні бути розглянуті екологічні наслідки вилучення германію, зокрема необхідність зменшення викидів і оптимізації процесів для мінімізації впливу на навколишнє середовище.

5. *Перспективи досліджень.* Подальші дослідження необхідні для покращення технологій та збільшення ефективності вилучення германію з бурого вугілля.

Дискусія і висновки

Комплекс проведених попередніх досліджень та вивчення методів вилучення германію з буровугільних родовищ з використанням сучасних технологій, зокрема в Луцькому басейні (Німеччина) та інших, на підставі даних щодо вмісту та умов поширення рідкоземельних та рідкісних металів, у тому числі і германію, у покладах вугілля та вугільній золі, доводить можливість та доцільність вилучення цих металів під час комплексного використання германієносних лігнітів Закарпаття.

Враховуючи зазначене, для ефективного та раціонального освоєння та комплексного відпрацювання родовищ бурого вугілля Закарпаття, запропоновано:

1. Розробити державну стратегію щодо вилучення рідкоземельних та рідкісних елементів, зокрема і германію в Україні.

2. Визначити основні переваги переробки бурого вугілля для енергетичної безпеки та технологічного розвитку України.

3. Розробити рекомендації щодо подальших наукових досліджень та інвестицій у видобуток германію в Україні.

4. Встановити податкові пільги для залучення надрокористувачами нових сучасних екологічно чистих технологій з вилучення германію з бурого вугілля.

Внесок авторів: Микола Бурлуцький – концептуалізація, формулювання ідей і визначення наступних завдань досліджень, методологія, написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування); Станіслав Литвинюк – валідація даних, кінцева обробка матеріалів, написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

- Баряцька, Н. В. (2020). Поняття критичної мінеральної сировини – інструмент стимулювання розвитку надрокористування в Україні. *Мінеральні ресурси України*, 2, 13–18.
- Блайда, І. А., Васильєва, Т. В., Слюсаренко, Л. І., Хитрич, В. Ф., Барба, І. М., & Васильєва, Н. Ю. (2011). Вилучення германію з відходів свинцево-цинкового виробництва хімічними і мікробіологічними методами. *Хімія металів і сплавів*, 4, 206–211.

Булат, А. Ф., & Баранов, В. А. (2021). Аналіз стану германієносності вугілля України. *Матеріали XIX Міжнародної конференції молодих вчених. Геотехнічні проблеми розробки родовищ*, Дніпро, с. 7–9.

Бучинська, І. В., Матрофайло, М. М., Побережський, А. В., Ступка, О. О., & Лазар, Г. І. (2023). Поширення германію у вугіллі Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну. *Геологічний журнал*, 4(385), 35–49. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.284910>

Левицький, Б. П. (1960). *Отчет о результатах поисково-опробовательских работ на германий, произведенных Закарпатской экспедицией на территории Станиславской и Закарпатской областей УССР в 1958–1959 гг.* Т. 1. Киев. геол.-развед. трест.

Литвинюк, С. Ф., & Баряцька, Н. В. (2024). Методичні підходи визначення та оцінки ресурсного потенціалу критичної мінеральної сировини України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(104), 77–85. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.10>

Портфолію критичної сировини України. (2023). Державна служба геології та надр України. <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/ukr/critical-minerals-portfolio-ua.pdf>.

Шехунова, С. Б. (2023). Критична та стратегічна мінеральна сировина для економічної безпеки та повноцінного розвитку України. *Вісник НАН України*, 5, 25–30. <https://doi.org/10.15407/vsn.2023.05.025>

An, Y.-L., Luo, K., Zhou, J.-X., Nguyen, A., Lu, M.-D., & Meng, Q.-T. (2022). Origin of the Devonian carbonate-hosted Banbianjie Ge-Zn deposit, Guizhou Province, South China: Geological, mineralogical and geochemical constraints. *Q J An Ore Geology Reviews*, 146, 104–696.

Australia's Critical Minerals List. (2023). Department of industry science energy and resources Australia. <https://www.industry.gov.au/publications/australias-critical-minerals-list>

Canada and U.S. Finalize Joint Action Plan on Critical Minerals Collaboration. (2020). Natural Resources Canada. News release. Ottawa, Ontario. <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2020/01/canada-and-us-finalize-joint-action-plan-on-critical-minerals-collaboration>

Carrara, S., Bobba, S., & Blagoeva, D. et al. (2023). *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/386650>.

Critical Materials Assessment. (2023). U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf

Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU. *Final Report*. DG GROW, European Commission. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54114/attachments/1/translations/en/renditions/native>

Guidelines. (2017). European Commission. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1>

Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank.

Luo, K., Zhou, J. X., Lu, M. D., & An, Y.-L. (2023). Origin of the Devonian carbonate-hosted Banbianjie Ge-Zn deposit, Guizhou Province, South China: Geological, mineralogical and geochemical constraints. *Ore Geology Reviews*, 148, 1–24.

Methodology for Establishing the EU List of Critical raw Materials. *Guidelines*. (2017). European Commission. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1>

Mineral Commodity Summaries. (2024). U.S. Geological Survey. Reston, Virginia.

Mykhailov, V., Malyuk, B., Bovsunivskyi, P., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Wellmer, F.-W., Horwath, Z., & Hollis, J. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. Orleans, France: BRGM (pp. 47–48, 181–182, 343).

Rafique, U., & Chang, Y. (2022). *Emerging Technologies and their Role in Critical Raw Materials Recovery*.

Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020.

Shpirt, M. Ya., Stopani, O. I., Lebedeva, L. N., & Kost, L. A. (2020). Germanium Production Technology Based on the Conversion of Germanium-Bearing Lignites. *Solid Fuel Chemistry*, 54(1), 1–10.

The Extraction and Separation of Scarce Critical Metals: A Review of Gallium, Indium and Germanium Extraction. (2024). *MDPI Separations*, Vol. 11, is. 4, p. 91.

Vogel, J., Mieke, N.-H., & Bertau, M. (2023). Germanium: Current and Novel Recovery Processes. *Chemie ingenieur Technik*, 95(6), 877–889.

References

- An, Y.-L., Luo, K., Zhou, J.-X., Nguyen, A., Lu, M.-D., & Meng, Q.-T. (2022). Origin of the Devonian carbonate-hosted Banbianjie Ge-Zn deposit, Guizhou Province, South China: Geological, mineralogical and geochemical constraints. *Q J An Ore Geology Reviews*, 146, 104–696.
- Australia's Critical Minerals List. (2023). Department of industry science energy and resources Australia. <https://www.industry.gov.au/publications/australias-critical-minerals-list>
- Bariatska, N. V. (2020). The concept of critical mineral raw materials – a tool for stimulating the development of subsoil use in Ukraine. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 13–18 [in Ukrainian].

- Blyda, I. A., Vasylieva, T. V., Slyusarenko, L. I., Khytrych, V. F., Barba, I. M., & Vasylieva, N. Yu. (2011). Extraction of germanium from lead-zinc production waste by chemical and microbiological methods. *Chemistry of metals and alloys*, 4, 206–211 [in Ukrainian].
- Buchynska, I. V., Matrofaio, M. M., Poberezhskiy A. V., Stupka O. O., & Lazar G. I. (2023). Distribution of germanium in coal of the LvivVolyn coal basin. *Geological magazine*, 4, 35–49. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.284910> [in Ukrainian].
- Bulat, A. F., & Baranov, V. A. (2021). Analysis of the germanium content of Ukrainian coal. *Proceedings of the XIX International Conference of Young Scientists. Geotechnical problems of deposit development, Dnipro*, p. 7–9 [in Ukrainian].
- Canada and U.S. Finalize Joint Action Plan on Critical Minerals Collaboration. (2020). Natural Resources Canada. News release. Ottawa, Ontario. <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2020/01/canada-and-us-finalize-joint-action-plan-on-critical-minerals-collaboration>
- Carrara, S., Bobba, S., & Blagoeva, D. et al. (2023). Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/386650>
- Critical Materials Assessment. (2023). U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf
- Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU. *Final Report*. DG GROW, European Commission. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54114/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- Guidelines. (2017). European Commission. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1>
- Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank.
- Levitskyi, B. P. (1960) *Report on the results of prospecting and testing for germanium, carried out by the Transcarpathian Expedition on the territory of the Stanislavsky and Transcarpathian regions of the Ukrainian SSR in 1958–1959*. Vol. 1. Kyiv. geol.-exploration trust [in Russian].
- Luo, K., Zhou, J. X., Lu, M. D., & An, Y.-L. (2023). Origin of the Devonian carbonate-hosted Banbianjie Ge-Zn deposit, Guizhou Province, South China: Geological, mineralogical and geochemical constraints. *Ore Geology Reviews*, 148, 1–24.
- Lytvyntsiuk, S., & Bariatska, N. (2024). Methodological approaches for determination and assessing the resource potential of critical raw materials in Ukraine. *Vysnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(104), 77–85. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.10> [in Ukrainian].
- Methodology for Establishing the EU List of Critical raw Materials. Guidelines. (2017). European Commission. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1>
- Mineral Commodity Summaries. (2024). U.S. Geological Survey. Reston, Virginia.
- Mykhailov, V., Malyuk, B., Bovsunivskyi, P., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Wellmer, F.-W., Horwath, Z., & Hollis, J. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. Orleans, France: BRGM (pp. 47–48, 181–182, 343).
- Portfolio of critical raw materials of Ukraine. State Service of Geology and Subsoil of Ukraine (2023). <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/ukr/critical-minerals-portfolio-ua.pdf> [in Ukrainian].
- Rafique, U., & Chang, Y. (2022). *Emerging Technologies and their Role in Critical Raw Materials Recovery*.
- Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020.
- Shehunova, S. B. (2023). Critical and strategic mineral raw materials for economic security and post-war development of Ukraine. *Visn. NAS of Ukraine*, 5, 25–30. <https://doi.org/10.15407/visn2023.05.025> [in Ukrainian].
- Shpirt, M. Ya., Stopani, O. I., Lebedeva, L. N., & Kost, L. A. (2020). Germanium Production Technology Based on the Conversion of Germanium-Bearing Lignites. *Solid Fuel Chemistry*, 54(1), 1–10.
- The Extraction and Separation of Scarce Critical Metals: A Review of Gallium, Indium and Germanium Extraction. (2024). *MDPI Separations*, 11(4) 91.
- Vogel, J., Mieke, N.-H., & Bertau, M. (2023). Germanium: Current and Novel Recovery Processes. *Chemie ingenieur Technik*, 95(6), 877–889.

Отримано редакцію журналу / Received: 02.09.24
Прорецензовано / Revised: 21.11.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Mykola BURLUTSKYY, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0009-0000-6718-3006

e-mail: Nikolay2205@i.ua

State Geology and Subsoil Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Stanislav LYTUVNIUK, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0000-0003-3763-2100

e-mail: lytvyniuksf@gmail.com

State Commission of Ukraine on Mineral Resources, Kyiv, Ukraine

GERMANIUM AS AN ELEMENT OF CRITICAL RAW MATERIALS. COAL DEPOSITS OF TRANSCARPATTIA – A SOURCE OF GERMANY IN UKRAINE

The concept of critical raw materials as it is interpreted in the USA, the European Union and other countries is defined. The main stages of the formation of the regulatory framework and the requirements of the USA and the EU regarding critical raw materials are provided. The chronology of changes in the amount of minerals, which are a component of critical mineral raw materials, is considered.

Ukraine is a country with a powerful mineral and raw material base, the riches of its subsoil are determined by the peculiarities of the geological structure of its territory. At the same time, our country is one of the world's leading producers of some types of minerals, including such important raw materials as manganese, titanium and graphite. There are about 22 critical minerals in our country, which are included, in particular, in the list of critical for the EU.

The analysis and prospects of using various methods and modern technologies with the aim of extracting germanium as one of the elements of critical raw materials were carried out. The possibility of using modern extraction methods in Ukraine, in particular for the lignite deposits of Transcarpathia, was considered.

At the same time, in Ukraine, it is the lignite deposits of Zakarpattia that have the potential to become an important source for the extraction of rare (rare earth) elements, particularly germanium. The reasons for the involvement of modern world technologies, which would contribute to the production of lignite in Zakarpattia in compliance with all existing ecological and socio-ecological requirements of the current legislation, have been determined.

The association of germanium with rare (rare earth) elements in these deposits can increase the economic value of their complex use, since there are foreign technologies that allow simultaneous extraction of several critical elements from one source.

The economic expediency of complex coal processing is indicated, taking into account the possibility of obtaining energy and critical elements, in particular germanium.

The introduction of leaching and flotation technologies is proposed to increase the efficiency of extraction. This will contribute to the economic growth of the region and meet global requirements for critical raw materials.

It is pointed out the need to introduce a Strategy for the extraction of rare earth and rare metals in Ukraine to improve the economic situation in the mining industry, in particular, the need for comprehensive development of lignite deposits, in particular Zakarpattia, with the use of lignite as fuel and rare earth metals as a source of modern technologies in industry.

Key words: critical mineral raw materials, germanium, lignite deposits, rare earth and rare metals, extraction of germanium.

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; in the decision to publish the results.