

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.048

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.06>

Микола БУРЛУЦЬКИЙ, канд. геол. наук

ORCID ID: 0009-0000-6718-3006

e-mail: Nikolay2205@i.ua

Державна служба геології та надр України, Київ, Україна

**ГЕРМАНІЙ У БУРОМУ ВУГІЛЛІ.
ЕВОЛЮЦІЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЙОГО ВИЛУЧЕННЯ**

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. В.А. Михайловим)

Вступ. Германій належить до переліку критичної сировини, визначеному Європейським Союзом (The European Commission, 2024). Дефіцит германію на світовому ринку зумовлює необхідність диверсифікації джерел його постачання та розвитку національних технологій з видобування цього елемента. Очікується, що майбутній попит на германій зростатиме, головним чином завдяки розвитку штучного інтелекту (вдосконалення високопродуктивних мікрочипів та фотонних компонентів) та систем зв'язку 5G/6G (високошвидкісні радіо- та оптичні мережі), а також підвищенню попиту з боку побутової електроніки (оптичні волокна, ІЧ-камери, оптичні компоненти), військового і оборонного секторів (ІЧ-датчики, системи нічного бачення, оптичні технології) та багатоперехідних сонячних елементів. За оцінками спеціалістів 60–75 % світового виробництва германію походить із цинкових руд, а решта – з летючої золи вугілля. Інші потенційні джерела германію включають залишки рафінування цинку, свинцю, міді, срібла, золота та нікелю. Вугілля було визначено як потенційне джерело германію ще в 1930-х рр. минулого століття. Сьогодні воно стало важливим джерелом германію. Майже дві третини загального обсягу первинного виробництва германію в Китаї припадає на германієвмісне вугілля (113 т Ge у 2019 р.), тоді як національні запаси оцінюються в 6670 т Ge (у вугільній золі). Останні прогнози вказують на зростання в подальшому внеску вугілля у виробництво германію. Зокрема, прогнозується, що до 2200 р. вугілля може постачати близько 16 000 т Ge, що можна порівняти з 17 000 т Ge, що буде забезпечуватися сульфідними цинковими рудами.

Методи. У статті розглянуто питання еволюції технологій вилучення германію з бурого вугілля у контексті формування сучасної мінерально-сировинної бази України. Проаналізовано основні етапи розвитку методів вилучення германію: від традиційних кислотно-гідрометалургійних технологій середини ХХ ст. до сучасних біотехнологічних, електрохімічних і мембранних методів, орієнтованих на зниження екологічного впливу.

Результати. Наведено результати систематизації вітчизняних і зарубіжних досліджень, виконано порівняння ефективності технологій у різні історичні періоди. Здійснено дослідження щодо закономірностей поширення германію в бурому вугіллі Закарпаття, а також запровадження сучасних екологічно безпечних методів його вилучення, виходячи з гірничо-геологічних умов рідкіснометалічного зруденіння та встановлених фактичних вмістів германію.

Висновки. Встановлено, що перспективними напрямками розвитку є комплексна переробка бурого вугілля та відходів золо-шлакових матеріалів із застосуванням принципів "Zero-Waste" і замкнених виробничих циклів. На прикладі буровугільних родовищ Закарпаття (Біганське, Новоселицьке) визначено закономірності поширення германію та обґрунтовано доцільність упровадження екологічно безпечних технологій його вилучення. Отримані результати можуть бути використані для розробки національних стратегій у сфері критичної сировини та підготовки до інтеграції України в Європейський простір сталого надрокористування.

Ключові слова: буре вугілля, германій, критична сировина, методи вилучення, екологічно безпечні технології, Закарпаття.

Вступ

Германій належить до переліку критичної сировини, визначеної Європейським Союзом у *European Critical Raw Materials Act* (The European Commission, 2024). Дефіцит германію на світовому ринку зумовлює необхідність диверсифікації джерел його постачання та розвитку національних технологій з видобування цього елемента.

Германій – історично важливий напівпровідник та новаторський матеріал у розвитку сучасної електроніки, який відіграв ключову роль у створенні перших діодів і транзисторів для підсилення та випрямлення електричних сигналів (Haller, 2006). Сьогодні германій та його основні сполуки – оксид германію (GeO_2), хлорид германію (GeCl_4) та сплави (SiGe) – є важливими для передових сучасних технологій та застосувань, пов'язаних з енергетикою (Benedikovic et al., 2021; Chen et al., 2022; Cook, 2022; Rosenberg, 2009; Yan et al., 2024), зокрема в електроніці, оптоелектроніці та фотоелектричних системах.

Глобальне виробництво рафінованого германію є відносно невеликим, але з початку його виробництво доволі коливалося, хоча загалом зростало протягом останніх 25 років, досягнувши 140 тонн у 2021 р.

(Arbuzov, & Ershov, 2007). Водночас Китай домінує на ринку, постачаючи 93,5 % металу (2022), далі йдуть Росія (3,6 %), Японія та США (по 1,4 %) (Distribution of Germanium Production..., 2025).

Ціна германію на кінець 2024 р. становила 3885,6 дол./кг, при цьому з січня 2020 р. ціни на германій відповідно до (Germanium Prices..., 2024; Robla, Alonso, & Alguacil, 2024) виросли майже на 90 %.

Очікується, що майбутній попит на германій зростатиме, переважно завдяки розвитку штучного інтелекту (вдосконалення високопродуктивних мікрочипів і фотонних компонентів) та систем зв'язку 5G/6G (високошвидкісні радіо- та оптичні мережі), а також підвищенню попиту з боку побутової електроніки (оптичні волокна, ІЧ-камери, оптичні компоненти), військового і оборонного секторів (ІЧ-датчики, системи нічного бачення, оптичні технології) та багатоперехідних сонячних елементів (Guzik, Burkiewicz, & Szlugaj, 2021; Patel, & Karamalidis, 2021; Sverdrup, & Haraldsson, 2024; Wong, Li, & Zeng, 2025).

Однак ситуація з постачанням нещодавно ускладнилася після того, як Китай запровадив обмеження на

експорт германію із серпня 2023 р., що збільшило ризики безперервності поставок та змусило внести відповідні зміни до ланцюгів постачання германію (Cui, & Jiang, 2025; Mei et al., 2024; Nassar et al., 2024; Regulation (EU) 2024/1252..., 2025; Umicore and STL..., 2025). В результаті експорт металевого германію з Китаю за рік до серпня 2024 р. знизився приблизно на 55 % (до 16,7 т) порівняно з аналогічним періодом 2023 р., причому більша частина експорту (65 %) була спрямована до Європейського Союзу (Бельгія, Німеччина) (National Minerals Information Center, 2025).

У 2024 р. Бельгія уклала партнерство з Демократичною Республікою Конго для переробки германію із залишків гірничодобувної промисловості, прагнучи до річного виробництва 30 т Ge, що потенційно забезпечує 30 % світового попиту (Tossou, 2025; Umicore and STL Sign..., 2025;)

Тим часом ціна на германій у березні 2025 р. зросла до 4150 дол./кг, що приблизно на 75 % більше, ніж у січні 2023 р. (Germanium Prices..., 2025).

За оцінками (Mei et al., 2024; Sverdrup, & Haraldsson, 2024) 60–75 % світового виробництва германію походить із цинкових руд, а решта — з летючої золи вугілля. Інші потенційні джерела германію включають залишки рафінування цинку, свинцю, міді, срібла, золота та нікелю (Germanium. SCREEN3..., 2025).

Вугілля було визначено як потенційне джерело германію ще в 1930-х рр. минулого століття (Lin, Soong, & Granite, 2018). Сьогодні воно стало важливим джерелом германію. Майже дві третини загального обсягу первинного виробництва германію в Китаї припадає на германіємісне вугілля (113 т Ge у 2019 р.) (Wong, Li, & Zeng, 2025), тоді як національні запаси оцінюються в 6670 т Ge (у вугільній золі) (Patel, & Karamalidis, 2021).

Росія має найбільшу частку активних і потенційних ресурсів германію у вугіллі (17 500 т) (Patel, & Karamalidis, 2021) у кількох германіємісних вугільних пластах (Seredin, & Finkelman, 2008).

США не виробляють германій з вугілля, але їхні запаси германію у вугіллі оцінюються приблизно в 1703000 т (Lin et al., 2018). Однак фактична кількість, що вилучається, ймовірно, набагато нижча, оскільки лише 16 % зразків у Базі даних якості вугілля Геологічної служби США (COALQUAL 3.0) говорить про вміст 10–235 ppm Ge (Patel, & Karamalidis, 2021).

Останні прогнози вказують на зростання в подальшому внеску вугілля у виробництво германію (Sverdrup, & Haraldsson, 2024). Зокрема, прогнозується, що до 2200 р. вугілля може постачати близько 16 000 т Ge, що можна порівняти з 17 000 т Ge, що буде забезпечуватися сульфідними цинковими рудами (Frenzel, Ketris, & Gutzmer, 2014).

Світові запаси германію в бурому вугіллі (на основі китайських і російських запасів вугілля із вмістом щонайменше 200 ppm Ge) оцінювалися в 104 000 т. Однак аналогічні розрахунки не могли бути проведені для кам'яного вугілля, оскільки не було відомо жодної шахти, яка б видобувала вугілля з такою високою концентрацією германію.

Відповідно до (Arbuzov, & Ershov, 2007) існують три великі родовища вугілля, що містять германій: родовище Спецуглі на Далекому Сході Росії, родовище Вулантуга у Внутрішній Монголії (Північний Китай) та родовище Ліньцан у провінції Юньнань (Південно-Західний Китай).

Огляд останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття науковий інтерес до германію як стратегічного критичного елемента суттєво зріс. Це зумовлено глобальними трендами розвитку високо-

технологічних галузей: фотоніки, мікроелектроніки, оптоелектроніки та оборонних систем. У цьому контексті буре вугілля та золо-шлакові відходи розглядаються як альтернативні джерела германію, що не потребують глибокої переробки руд та можуть забезпечити підвищення ресурсної доступності.

Сучасні дослідження (2020–2025 рр.) відображають кілька ключових тенденцій:

1. *Геохімічні аспекти та мінеральні форми германію.* Низка робіт присвячена уточненню форм перебування германію у вугіллі, зокрема його зв'язку з органічною речовиною, каолінітами та сульфідними компонентами (Бурлуцький, 2024; Левицький, 1960; Li et al., 2022;). Дослідники відзначають, що органічно зв'язаний германій є найбільш мобільним у процесах вилуговування та термічної обробки.

2. *Технологічні підходи до вилучення.* Оновлені гідро-металургійні схеми, що включають лужне, кислотне та комбіноване вилуговування, демонструють зростання ефективності завдяки оптимізації температурних режимів, рН-середовища та застосуванню комплексотвірних реагентів. Паралельно активно розвиваються термохімічні підходи, зокрема контрольований піроліз і волатилізація германію у вигляді летких сполук (Li et al., 2022; Zhang et al., 2020).

3. *Екологічні та "зелені" технології.* Новітні роботи демонструють перспективність біовилуговування із залученням бактерій *Acidithiobacillus* та застосування мембранних фільтраційних систем для селективного вилучення Ge з низьких концентрацій у технологічних розчинах. Ці підходи дозволяють зменшити кількість токсичних викидів та забезпечити циркуляцію реагентів у замкненому циклі (Robla, Alonso, & Alguacil, 2024; Rudnik, 2025).

4. *Комплексна переробка та Zero-Waste концепція.* Науковці підкреслюють важливість поєднання вилучення германію з утилізацією золи, виробництвом будівельних матеріалів та виділенням супутніх критичних елементів, таких як Ga, In, REE. Такі підходи відповідають сучасним європейським вимогам сталого надрокористування (Jiang, Zhang, & Liu, 2021; Rudnik, 2025; Yan et al., 2020).

Загалом огляд літератури свідчить, що екологічно безпечні технології вилучення германію з бурого вугілля стають ключовим напрямом досліджень, спрямованим на заміщення традиційних енергоємних процесів та забезпечення ресурсної незалежності країн ЄС, включно з Україною.

Методи

Проведено аналіз попередніх досліджень як вітчизняних, так і закордонних авторів.

Виконано систематизацію технологій та методів вилучення германію, зокрема з бурого вугілля.

Розглянуто хронологію змін, що відбулися в часі у технологіях вилучення германію.

Здійснено власні дослідження щодо закономірностей поширення германію в бурому вугіллі Закарпаття, а також стосовно запровадження сучасних екологічно безпечних методів вилучення, виходячи з гірничо-геологічних умов рідкіснометалічного зрудніння та встановлених фактичних вмістів германію.

З цього приводу варто зазначити те, що наявність германію у вугіллі не обов'язково означає, що його фактичне та економічне вилучення є вигідним, оскільки рівень вилучення безпосередньо пов'язаний з граничним вмістом (Rudnik, 2025).

Френцель та інші (Frenzel et al., 2014) розподілили вугілля на три групи залежно від вмісту германію: 8–32 ppm, 32–200 ppm та понад 200 ppm, що вказує на різні рівні

екстрагованого германію на рівні 13 %, 33 % та 100 % відповідно. Значення 300 ppm Ge у вугільній золі було рекомендовано як граничний вміст (Dai et al., 2018), Лін та інші (Lin et al., 2018) оцінили, що цей поріг відповідає 41 ppm германію у вугіллі, припускаючи середній вихід золи близько 13 %.

Для китайського вугілля 100 ppm було заявлено як мінімальний промисловий критерій (Li et al., 2022). Разом з тим Шпірт та інші (Shpirt et al., 2013) запропонували мінімальні концентрації германію у вугіллі та летучій золі на рівні 30 ppm та 100 ppm відповідно. У свою чергу, Саліхов та інші (Salikhov et al., 2021) рекомендували вміст Ge у 10 ppm для вугілля, як такий, що становить практичний інтерес.

У золі деяких сортів вугілля вміст германію досягає 1 %, а зола колумбійського лігніту містить його від 2 до 9 %. При отриманні генераторного газу в процесі газифікації кам'яного вугілля і спалюванні коксу при обмеженому доступі повітря германій і галій у вигляді оксидів осідають у пиловловлювачах і димарях разом з леткими компонентами золи. При цьому понад 60 % германію виноситься разом з газами та осідає в пиловловлювачах і димарях.

У Закарпатському буровугільному басейні германієвмісні родовища приурочені до відкладів ільницької світи неогену Чоп-Мукачівської та Солотвинської западин, де представлені Новоселицьким і Біганським буровугільними родовищами. Вміст германію в бурому вугіллі Новоселицького родовища досягає 280 г/т, Біганського родовища, як одного з найперспективніших на германій буровугільних родовищ, – до 1000 г/т (Бурлуцький, 2024).

Варто зазначити, що германій у значних кількостях трапляється не тільки в бурому вугіллі (лігнітах), але й у вуглистих глинах, де концентрація германію досягає 200 г/т (Левицький, 1960).

У 1969 р. Закарпатською ГРЕ на Біганському родовищі виконувалися роботи, за результатами яких у 1969 р. було складено звіт "Про попередню розвідку Біганського родовища германієносних лігнітів" (Левицький та ін., 1969), в якому підрахунок запасів виконано станом на 01.05.1969.

Враховуючи, що найбільший вміст германію в бурому вугіллі (лігнітах) в Україні встановлено саме в Закарпатті, в регіоні, де значну частину території займають землі природно-заповідного та лісового фонду, в межах цих земельних ділянок розташовано багато реакраційних зон, санаторіїв, баз відпочинку тощо, тому виникає необхідність у запровадженні саме сучасних ефективних та екологічно безпечних технологій і методів вилучення германію, у разі необхідності вилучення його та інших цінних компонентів, що присутні тут.

Мета дослідження: провести аналіз сучасних технологій та методів вилучення германію, зокрема з бурого вугілля, з метою комплексного та ефективного використання його не тільки як джерела отримання теплової енергії, а також сировини для вилучення рідкісних, розсіяних, зокрема і германію, а також рідкісноземельних елементів.

Наукова новизна дослідження полягає в систематизації історичного розвитку технологій вилучення германію, порівнянні їх ефективності, а також у визначенні екологічно безпечних напрямів для подальшого впровадження у промисловість. Такий підхід відповідає принципам циркулярної економіки та стратегії *European Green Deal*.

Європейська зелена угода, представлена у грудні 2019 р., є флагманською стратегією Європейського Союзу щодо переходу економіки до кліматичної нейтральності до 2050 р. Це не просто екологічна ініціатива, а комплексний план економічної та промислової трансформації, спрямований на модернізацію економіки ЄС, підвищення

ефективності використання ресурсів та відокремлення зростання від деградації навколишнього середовища

У 2021 р. ЄС запровадив "Зелену угоду для України", що передбачає діалог щодо впровадження кліматичної нейтральності в Україні та інтеграції українських екологічних і кліматичних політик до загальноєвропейських стандартів (Resource, & Analysis Center..., 2021). Вона спрямована на перетворення економіки України відповідно до Європейського зеленого курсу (*European Green Deal*), що має на меті досягнення кліматичної нейтральності до 2050 р. Зелена угода для України включає перехід до сталої, низьковуглецевої економіки, розвиток відновлюваної енергетики та поліпшення екологічної ситуації, хоча процес впровадження в Україні ускладнений війною (<https://eu4ukraine.eu/greengeal-ua>).

Результати

Германій унаслідок незначного вмісту в земній корі й геохімічної спорідненості з деякими дуже поширеними елементами виявляє обмежену здатність до утворення власних мінералів, проникаючи в кристалічні решітки інших мінералів. Тому власні мінерали германію трапляються вкрай рідко.

Уміст германію у вугіллі різних пластів варіює в широкому діапазоні. У різні часи на етапах розвідувальних робіт та на стадії освоєння родовищ вугілля тривали дослідження вмісту германію у вугіллі для його подальшого вилучення.

Германій є важливим елементом у сучасних технологіях, зокрема в оптиці, електроніці та сонячній енергетиці. З розвитком цих галузей попит на германій значно зріс, що стимулювало пошук ефективних методів його вилучення з різних джерел, включаючи буре вугілля. Германій у бурому вугіллі часто супроводжується іншими рідкісними та рідкісноземельними елементами, що робить такі родовища перспективними для комплексного видобутку.

Залежно від складу вихідної сировини застосовують різні способи первинного оброблення матеріалу для отримання багатших за вмістом германію продуктів – германієвих концентратів. Це може бути вилуговування сірчаною кислотою або вилучення германію методами екстракції та сорбції. Супутнє вилучення германію з вугілля, продуктів його перероблення і шахтних вод нині цілком реальне, і може сприяти підвищенню рентабельності роботи вугільних підприємств (Васильєва, 2019).

Германій – це стратегічний метал, і його вилучення з бурого вугілля має значну історію інновацій. Протягом останніх десятиліть технології вилучення германію з бурого вугілля зазнали значних змін, спрямованих на підвищення ефективності та зменшення екологічного впливу.

У хронології змін технологій та методів вилучення германію з вугілля можна виділити кілька етапів:

1. **Ранні етапи (1950–1970 рр. XX ст.).** Дослідження методів вилучення германію з бурого вугілля розпочалися в середині XX ст. Ранні роботи фокусувалися на виявленні вмісту германію у вугіллі різних родовищ та розробці базових методів його вилучення (Кулиненко, Пазухина, & Бердюкова, 1962; Nabashi, 1966). На початку розробки методів вилучення германію з бурого вугілля використовувалися переважно піроліз та хімічна обробка з використанням сильних кислот (наприклад, соляної або сірчаної). Ці методи були енергоємними та супроводжувалися значними викидами токсичних речовин у навколишнє середовище. Таким чином, ранні дослідження показали низьку ефективність вилучення та високе екологічне навантаження.

2. **Вдосконалення методів вилучення германію (1980–2000 рр.).** У другій половині XX ст. підвищення

екологічних вимог стимулювало розвиток нових технологій вилучення германію з бурого вугілля та його золи. На цьому етапі було впроваджено гідрометалургійні процеси, зокрема вилуговування германію із зол та попелу бурого вугілля за допомогою лужних розчинів (наприклад, NaOH), що дало змогу зменшити викиди кислот у навколишнє середовище. Ранні дослідження показали, що такі методи мають вищу ефективність, ніж традиційні кислотні процеси, і водночас менший негативний вплив на екологію. Вони створили основу для подальшого розвитку технологій вилучення германію на пілотному та промисловому рівнях (Лосев та ін., 1983).

3. *Сучасні екологічно орієнтовані методи (2000–2020 рр.)*. На сучасному етапі акцент зроблено на зменшенні екологічного впливу. Використовуються біотехнологічні методи, такі як біовилуговування за допомогою мікроорганізмів, а також іонний обмін та мембранні технології для селективного вилучення германію (Блайда та ін., 2017; Arbuzov, & Ershov, 2007).

На сьогодні основний тренд – мінімізація екологічного впливу та максимальне використання ресурсів:

1. Комплексна переробка золошлакових відходів.

- Поєднання біовилуговування, електрохімічного вилучення та сорбції дає змогу ефективно видобувати германій без утворення великої кількості токсичних відходів.

2. Мембранні технології.

- Використання нанофільтрації та зворотного осмосу для виділення германію з промислових стоків.

- Висока ефективність та мінімальне утворення відходів.

3. Zero-Waste підходи.

- Утилізація всіх компонентів вугільної золи (германій, рідкісноземельні метали, кремнезем) для мінімізації відходів.

- Включення германієвмісних відходів у виробництво будівельних матеріалів.

4. Перспективи (після 2020 р.). Сьогодні дослідження спрямовані на розробку замкнутих циклів виробництва, де відходи процесу вилучення германію повторно використовуються. Також активно розглядаються методи з використанням відновлюваних джерел енергії ("зелені" технології) для зменшення вуглецевого сліду, зокрема методи з мінімальним впливом на навколишнє середовище (Jiang, Zhang, & Liu, 2021; Rudnik, 2025).

Порівняння різних методів вилучення германію показує, що сучасні технології є більш ефективними та екологічно безпечними порівняно з ранніми методами. Використання біотехнологій дає змогу знизити використання шкідливих хімічних реагентів і впровадити нергоспоживання.

Основними виробниками та споживачами германію є високотехнологічні підприємства та наукові установи в таких країнах, як Бельгія, Німеччина, Канада, Китай, Росія, США, Франція та Японія.

Очікується зростання попиту на германій у світі. За прогнозами до 2030 р. попит на цей метал становитиме 320–400 тонн на рік, а його виробництво збільшиться майже в 1,5 рази. Найбільше зростання очікується в інфрачервоній та волоконній оптиці, де прогнозується щорічне збільшення попиту на 5,6 % (Patent: CN101186975B).

Приклади родовищ бурого вугілля з екологічними методами вилучення германію:

1. *Німеччина, Лужицький басейн*. У Німеччині, зокрема в Лужицькому басейні, буре вугілля містить слідові концентрації германію, що робить регіон перспективним для його вилучення. У сучасних дослідженнях описано технології гідрометалургійного вилуговування та

біотехнологічні підходи, які дають змогу значно зменшити екологічний вплив процесу:

- вилуговування германію з летючої золи з використанням катехолу та подальша селективна екстракція демонструють високий вихід Ge із мінімальним хімічним забрудненням (Arroyo, & Fernandez-Pereira, 2008);

- біотехнологічні методи, наприклад, мікробне вилуговування бурого вугілля, показують значну ефективність відновлення германію, забезпечуючи екологічно безпечний процес (Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament).

Сучасні підходи включають вакуумну редукцію та одностадійні методи синтезу частинок GeAs із золи, що одночасно вилучають Ge та утворюють високочистий продукт (Finkelman, Palmer, & Wang, 2018). Ці технології можуть бути адаптовані для Лужицького басейну з урахуванням його геохімічних особливостей, забезпечуючи ефективне та екологічно прийнятне вилучення германію з бурого вугілля.

У цьому регіоні застосовуються сучасні методи вилучення германію з бурого вугілля та його золи, а саме: вилучення германію за допомогою органічних розчинників, використання наночастинок для селективного вилучення, що дають змогу зменшити екологічний вплив процесу (Arroyo, & Fernandez-Pereira, 2008; Finkelman, Palmer, & Wang, 2018).

2. *Китай, провінція Юньнань*. Китай є світовим лідером з видобутку германію. На його частку припадає 94 % поставок галію та 83 % германію згідно з дослідженням Європейського Союзу щодо критичної сировини минулого року. У Китаї активно розробляються методи вилучення германію з бурого вугілля, включаючи використання біогідрометалургійних технологій та сорбційних методів, що сприяють екологічно безпечному видобутку цього елемента. На родовищах Юньнань та Внутрішньої Монголії використовуються гідрометалургійні методи вилучення германію із золівих відходів, а також використання іонного обміну для селективного виділення германію (Rudnik, 2025; Zhang et al., 2020).

3. *США, Північна Дакота, Вайомінг*. У США буре вугілля містить невеликі концентрації германію, але великі обсяги видобутку роблять його потенційним джерелом. На цей час проводяться лабораторні та промислові дослідження щодо впровадження технологій, які б зменшили екологічні витрати, дали можливість повторно використовувати воду й мінімізувати відходи (Mann et al., 2021).

4. *Індія*. Родовища бурого вугілля в штаті Ассам містять значні концентрації германію. Планується впровадження комбінованих методів вилучення.

5. *Австралія*. Родовища в штаті Вікторія містять германій та рідкоземельні елементи. Використовуються гідрометалургійні методи.

6. *Польща*. Родовища бурого вугілля в Люблінському басейні містять германій. Проводяться дослідження з використання біотехнологічних методів.

Україна має перспективні родовища бурого вугілля з високим вмістом германію, зокрема Біганське та Новоселицьке родовища, що розташовані в Берегівському районі Закарпатської області.

Так, вміст германію в бурому вугіллі Новоселицького родовища складає до 280 г/т, Біганського родовища, як одне з найперспективніших на германій буровугільних родовищ, до 1000 г/т.

Порівняно з іншими країнами, такими як Німеччина та Китай, українські родовища мають конкурентний вміст германію, що робить їх привабливими для подальших досліджень і можливого промислового освоєння.

У 1980-ті роки було навіть розроблено технологію промислового освоєння Біганського родовища шляхом спалювання лігнітів на Ужгородській ТЕС, з подальшою гідрометалургійною переробкою золи та пилу, що містять кілька кілограмів германію на тонну.

На сьогодні для закарпатських родовищ бурого вугілля з високим вмістом германію пропонуються сучасні методи, такі як біовилуговування та використання іонообмінних смол, для екологічно безпечного видобутку германію.

Варто зазначити, що германій у значних кількостях зустрічається не тільки у бурому вугіллі (лігнітах) Закарпаття, але і у вуглистих глинах, де концентрація германію досягає 200 г/т.

Вирішальним фактором у розподілі германію в пластах є характер рослинного матеріалу з якого цей пласт складений. Виходячи з аналізу результатів проведених робіт (Левицький, 1960), найбільш високі змісти германію (до 1000 г/т) приурочені до чистих різновидів лігніту, і саме слабо вуглефікованих деревних залишків, від кількості яких залежить концентрація германію в пласті загалом. Цілком зрозуміло, що германій у лігнітах пов'язаний з гуміновими кислотами, утворюючи металоорганічні сполуки.

Підвищені концентрації германію Біганського родовища було встановлено в трьох пластах лігніту (I, II III), з яких промислове значення має пласт II.

Глибина його залягання від 110 м на півдні до 220 м на півночі родовища. Потужність його змінюється від 0,2 до 2,0 м і в середньому по родовищу сягає 1,07 м.

Запаси германію за результатами проведених геологорозвідувальних робіт затвердила науково-технічна рада Київського геологорозвідувального тресту (протокол від 26.06.1969 № 1255) за категоріями геологічної вивченості у кількості: C_1 – 393 т, C_2 – 279 т, позабалансові – 169 т, прогнозні ресурси категорії P_1 – 301 т.

Проте останні роботи щодо геолого-економічної оцінки перспективності германієносності лігнітів Біганського родовища проводилися у 1985–1987 рр. (Житняк, 1987).

Новоселицьке родовище розташоване в Берегівському районі Закарпатської області. Максимальний вміст германію сягає 282 г/т. Поширення германію по вугільному пласту – нерівномірне, підвищені його змісти трапляються як у нижній, так і в середній та верхній частинах вугільного пласта. Відносно чітко тут спостерігається залежність між зольністю вугільного пласта та його германієністю. Але іноді в пробах спостерігається підвищений вміст германію і в засмічених вугільних пластах. Найбільші змісти германію спостерігаються в центральній частині родовища (Левицький, 1960).

Дискусія і висновки

Еволюція методів вилучення германію з бурого вугілля демонструє значний прогрес у напрямі екологічної безпеки та ефективності. Такі країни, як Китай, Німеччина, Австралія, Канада, Бельгія, активно розвивають технології у цій сфері, забезпечуючи значну частку світового виробництва германію.

Незважаючи на глобальні тенденції, спрямовані на скорочення використання вугілля для виробництва енергії, воно залишається важливим ресурсом, а вугільна зола може бути цінним джерелом германію.

Сучасні технології вилучення германію поступово відходять від традиційних, екологічно небезпечних методів на користь біотехнологічних, електрохімічних і мембранних методів. Це дає змогу зменшити негативний вплив на довкілля та зробити процес видобутку германію більш ефективним і сталим та відповідним сучасним вимогам.

У вітчизняних умовах найперспективнішим є використання комбінованих схем, що поєднують біосорбційні процеси та електрохімічне осадження. Це дозволяє скоротити витрати реагентів і мінімізувати екологічний вплив. Порівняння з даними міжнародних досліджень свідчить, що потенційна рентабельність вітчизняних технологій (у разі прийняття програми щодо використання бурого вугілля як джерела для вилучення германію) може також бути підвищена за рахунок модернізації етапу вилуговування та впровадження зворотного вододобігу. Таким чином, Україна має можливість інтегруватися у глобальні ланцюги постачання критичних мінералів, забезпечуючи екологічно безпечне виробництво германію для європейського ринку.

Джерела фінансування. Автори заявляють про відсутність зовнішнього фінансування для проведення цього дослідження та підготовки рукопису до публікації.

Список використаних джерел

- Блайда, І. А., Васильєва, Н. Ю., Васильєва, Т. В., & Слюсаренко, Л. І. (2017). Аналіз дисперсій для оптимізації процесу біовилуговування германію з відвалів збагачувальних комплексів вугілля. *Біотехнологія. Серія А*, 10(4), 44–51. <https://doi.org/10.15407/biotech10.04.044>
- Бурлуцький, М. С. (2024). Перспективи комплексного освоєння буровугільних родовищ Закарпаття як джерела отримання критичної мінеральної сировини. *Мінеральні ресурси України*, 1, 35–40.
- Васильєва, І. В. (2019). Уміст германію у вугільних пластах Львівсько-Волинського басейну та Донбасу. *Мінеральні ресурси України*, 3, 11–14.
- Житняк, М. Ю. (1987). *Отчет о поисково-оценочных работах на бурый уголь по Лоховскому участку и оценка перспектив германиеносности Новоселицкого и Беганьковского месторождений бурого угля*. (Кн. 1). Береговская ГРЭ.
- Кулиненко, О. Р., Пазухина, Д. К., & Бердюкова, М. Д. (1962). Содержание германия в углях Львовско-Волинского бассейна. Днепропетровск: Днепропетровская экспедиция УкрНИГРИ, 215 с.
- Левицький, Б. П., Мызников, Д. Ф., Левицкая, Р. Л., & Дмитриева, Е. А. (1969). *Отчет о предварительной разведке Беганьковского месторождения германиеносных лигнитов*. (Т. 1). Закарпатская геологическая экспедиция.
- 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). Киевский геологоразведочный трест.
- Лосев, Б. И., Юткин, Л. А., Мельников, А. Н., & Саприкин, Ф. Я. (1983). Способ извлечения германия с угля в жидкой среде. (Патент СССР SU 110688 A1).
- Arbuzov, S. I., & Ershov, V. V. (2007). Germanium Extraction from Coal: A Review. *Ore Geology Reviews*, 10–15.
- Arroyo, F., & Fernandez-Pereira, C. (2008). Hydrometallurgical recovery of germanium from coal gasification fly ash: Solvent extraction method. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(9). <https://doi.org/10.1021/ie7016948>
- Benedikovic, D.; Viro, L.; Aubin, G.; Hartman, J. M., Amar, F. et al. (2021). Silicon-germanium receivers for short-wave-infrared optoelectronics and communications. *Nanophotonics*, 10, 1059–1079.
- Chen, H., Wei, M., He, Y., Abed, J., Teale, S., Sargent, E. H., & Yang, Z. (2022). Germanium silicon oxide achieves multicolour ultra-long phosphorescence and delayed fluorescence at high temperature. *Nature Communications*, 13, 4438.
- Cook, B. (2022). Silicon-germanium: The legacy lives on. *Energies*, 15, 2957.
- Cui, L., & Jiang, Y. (2025). Quantitative analysis of the U.S. chip embargo and China's export controls on GaGe and graphite. *Computers and Industrial Engineering*, 200, 110860.
- Dai, Shifeng; Finkelman, R. B., & Robert B. (2018). Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects. *International Journal of Coal Geology*, 186, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.06.005>
- Distribution of Germanium Production Worldwide in 2022, by Country. *Statista*. Available online: <https://www.statista.com/statistics/1445497/germanium-share-of-production-worldwide-by-country/>
- Finkelman, R. B., Palmer, C. A., & Wang, P. (2018). Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. *International Journal of Coal Geology*, 185, 138–160. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.09.005>
- Frenzel, M., Ketris, M. P., & Gutzmer, J. (2014). On the geological availability of germanium. *Mineralium Deposita*, 49, 471–486.
- Germanium Prices. *Strategic Metal Invest*. Available online: <https://strategicmetalsinvest.com/germanium-prices/> (accessed on 10 October, 2024).
- Germanium. SCREEN3. Available online: <https://screen.eu/cms-2023/>
- Germanium Prices. *Strategic Metal Invest*. Accessed March 11, 2025.

- Guzik, K., Burkiewicz, A., & Szlugaj, J. (2022). The EU's demand for selected critical raw materials used in the photovoltaic industry. *Mineral Resources Management*, 38, 31–59.
- Habashi, F. (1966). Handbook of Extractive Metallurgy, Vol. 3, Elsevier. *Section Scattered Metals*, 20–30.
- Haller, E. E. (2006). Germanium: From its discovery to SiGe device. *Mater. Sci. Semicond. Process*, 9, 408–422. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2006.08.063>
- Jiang, T., Zhang, T., & Liu, Z. (2021). Review on resources and recycling of germanium, with special focus on characteristics, mechanism and challenges of solvent extraction. *Journal of Cleaner Production*, 280, 126217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126217>
- Li, Y., Pan, S., Ning, S., Shao, L., Jing, Z., & Wang, Z. (2022). Coal measure metallogeny: Metallogenic system and implication for resource and environment. *Science China Earth Sciences*, 65, 1211–1228.
- Lin, R., Soong, Y., & Granite, E. J. (2018). Evaluation of trace elements in U.S. coals using USGS COALQUAL database version 3.0. Part II: Non-REY critical elements. *International Journal of Coal Geology*, 192, 39–50.
- Mann, M. D., Theaker, N. L., Rew, B. J., Benson, S. A., Benson, A., Palo, D., Haugen, C., & Laudal, D. (2021). Investigation of Rare Earth Element Extraction from North Dakota Coal-Related Feedstocks (Phase 2 Final Technical Report). (DOE Report). *U.S. Department of Energy*. <https://doi.org/10.2172/1785352>
- Mei, Y., Geng, Y., Chen, Z., Xiao, S., & Gao, Z. (2024). Ensuring the sustainable supply of semiconductor material: A case of germanium in China. *International Journal of Production Economics*, 271, 109231.
- Nassar, N. T., Shojaeddini, E., Alonso, E., Jaskula, B., & Tolcin, A. (2024). Quantifying potential effects of China's gallium and germanium export restrictions on the EU economy. *U.S. Geological Survey*.
- National Minerals Information Center. (2025). Germanium. *Mineral Commodity Summaries*, 80–81.
- Patel, M., & Karamalidis, A. K. (2021). Germanium: A review of its U.S. demand, uses, resources, chemistry, and separation technologies. *Separation and Purification Technology*, 275, 118981.
- Patent: CN101186975B. Method for extracting germanium from lignite.
- 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 (Text with EEA Relevance). Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401252 (accessed on 20 February 2025).
- Resource & Analysis Center "Society and Environment". (2021). Mapping of strategic targets of Ukraine and the EU in the context of the European Green Deal: Development vectors and flagship initiatives (*Policy paper*).
- Robla, J. I., Alonso, M., & Alguacil, F. J. (2024). Recovery of Lesser-Known Strategic Metals: The Gallium and Germanium Cases. *Processes*, 12(11), 2545; <https://doi.org/10.3390/pr12112545>
- Rosenberg, E. (2009). Germanium: Environmental occurrence, importance and speciation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 8, 29–57.
- Rudnik, E. (2025). Challenges and opportunities in hydrometallurgical recovery of germanium from coal by-products. *Molecules*, 30(8), 1695. <https://doi.org/10.3390/molecules30081695>
- Salikhov, V. A., Strakhov, V. M., & Yedilbaev, A. I. (2021). Assessing the content of nonferrous and rare metals in nonlinkering Kazakh coal. *Coke and Chemistry*, 64, 279–283.
- Seredin, V. V., Finkelman, R. B. (2008). Metalliferous coals: A review of main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology*, 76, 253–289.
- Shpirt, M. Y., Nukenov, D. N., Punanova, S. A., & Visaliev, M. Y. (2013). Principles of the production of valuable metal compounds from fossil fuels. *Solid Fuel Chemistry*, 47, 71–82.
- Sverdrup, H. U., & Haraldsson, H. V. (2024). Assessing the long-term sustainability of germanium supply and price using the WORLD7 model. *Biophysical Economics and Sustainability*, 9, 5.
- The European Commission. (2024). European Critical Raw Materials Act: *Strengthening EU supply chains*. Brussels: European Union.
- Tossou, E. (2025). DR Congo: Gécamines starts exporting germanium from new Lubumbashi plant. *Ecofin Agency*.
- Umicore and STL Sign Partnership Related to Germanium Recycling from Big Hill's Mining Waste Materials in DRC. Umicore. Available online: <https://www.umicore.com/en/media/newsroom/umicore-and-stl-sign-partnership-related-to-germanium-recycling/>
- Wong, M., Li, J., & Zeng, X. (2025). Uncovering the germanium sustainability up to 2050 in China. *Frontiers in Environmental Science and Engineering*, 19, 25.
- Yan, T., Li, L., Zhang, Y., Hao, J., Meng, J., & Shi, N. (2024). High-performance germanium photodetectors on silicon photonics platform. *Sensors and Actuators A: Physical*, 376, 115535.
- Zhang, Y., Li, S., Li, H., Yin, S., Zhu, R., & Zhang, L. (2020). Progress in processes for extracting germanium from Ge-bearing materials. *Metallurgical Engineering*, 7(3), 163–168. <https://doi.org/10.12677/meng.2020.73023>. <https://eu4ukraine.eu/greengeal-ua>
- germanium from coal beneficiation waste dumps. *Biotechnology. Series A*. 10(4): 44–51 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/biotech10.04.044>
- Burlutskyy, M. S. (2024). Prospects for the comprehensive development of brown coal deposits in Transcarpathia as a source of raw mineral resources. *Mineral resources of Ukraine*, 1, 35–40 [in Ukrainian].
- Vasylieva, I. V. (2019). Germanium content in coal seams of the Lviv-Volyn Basin and Donbass. *Miner. resources of Ukraine*, 3, 11–14 [in Ukrainian].
- Zhytnyak, M. Yu. (1987). *Report on prospecting and evaluation works for lignite at the Lohovsky site and assessment of the prospects of germanium-bearing capacity of the Novoselytske and Begankivske lignite deposits*. (Book 1). Berehove GEE [in Russian].
- Kulinenko, O. R., Pazukhina, D. K., & Berdyukova, M. D. (1962). The content of germanium in the coals of the Lviv-Volyn basin. Dnipropetrovsk: Dnepropetrovsk expedition UkrNIHRY [in Russian].
- Levitskiy, B. P. (1960). *Report on the results of Germanium prospecting and testing conducted by the Zaccarpattian Expedition on the territory of the Stanislavsky and Zaccarpattian regions of the Ukrainian SSR in 1958-1959*. (Vol. 1). Kyiv: Kyiv geological prospecting trust. [in Russian].
- Levitskiy, B. P., Myznikov, D. F., Levitskaya, R. L., & Dmitrieva, E. A. (1969). *Report on the preliminary exploration of the Beganskoye deposit of germanium-bearing lignites*. Berehovo: Transcarpathian Geological Expedition. (Vol. 1) [in Russian].
- Losev, B. I., Yutkin, L. A., Melnikov, A. N., Saprykin, F. Ya. (1983). Method for extracting germanium from coal in a liquid medium (USSR Patent SU 110688 A1). [in Russian].
- Arbuzov, S. I., & Ershov, V. V. (2007). Germanium Extraction from Coal: A Review. *Ore Geology Reviews*, 10–15.
- Arroyo, F., & Fernandez-Pereira, C. (2008). Hydrometallurgical recovery of germanium from coal gasification fly ash: Solvent extraction method. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(9). <https://doi.org/10.1021/ie7016948>
- Benedikovic, D., Viot, L., Aubin, G., Hartman, J. M., Amar, F. et al. (2021). Silicon-germanium receivers for short-wave-infrared optoelectronics and communications. *Nanophotonics*, 10, 1059–1079.
- Chen, H., Wei, M., He, Y., Abed, J., Teale, S., Sargent, E. H., Yang, Z. (2022). Germanium silicon oxide achieves multicolour ultra-long phosphorescence and delayed fluorescence at high temperature. *Nature Communications*, 13, 4438.
- Cook, B. (2022). Silicon-germanium: The legacy lives on. *Energies*, 15, 2957.
- Cui, L., Jiang, Y. (2025). Quantitative analysis of the U.S. chip embargo and China's export controls on GaGe and graphite. *Computers and Industrial Engineering*, 200, 110860.
- Dai, Shifeng; Finkelman, Robert B. (2018). *Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects*. *International Journal of Coal Geology*, 186, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.06.005>
- Distribution of Germanium Production Worldwide in 2022, by Country. Statista. Available online: <https://www.statista.com/statistics/1445497/germanium-share-of-production-worldwide-by-country/>
- Finkelman, R.B., Palmer, C.A., Wang P. (2018). Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. *International Journal of Coal Geology*, 185, 138–160. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.09.005>
- Frenzel, M., Ketris, M. P., Gutzmer, J. (2014). On the geological availability of germanium. *Mineralium Deposita*, 49, 471–486.
- Germanium Prices. Strategic Metal Invest. Available online: <https://strategicmetalsinvest.com/germanium-prices>
- Germanium. SCREEN3. Available online: <https://screen.eu/crms-2023/> (accessed on 20 February 2025).
- Germanium Prices. (2025). *Strategic Metal Invest*. Accessed March 11.
- Guzik, K., Burkiewicz, A., & Szlugaj, J. (2022). The EU's demand for selected critical raw materials used in the photovoltaic industry. *Mineral Resources Management*, 38, 31–59.
- Habashi, F. (1966). Handbook of Extractive Metallurgy, Vol. 3, Elsevier. *Section Scattered Metals*, 20–30.
- Haller, E. E. (2006). Germanium: From its discovery to SiGe device. *Mater. Sci. Semicond. Process*, 9, 408–422. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2006.08.063>
- Jiang, T., Zhang, T., & Liu, Z. (2021). Review on resources and recycling of germanium, with special focus on characteristics, mechanism and challenges of solvent extraction. *Journal of Cleaner Production*, 280, 126217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126217>
- Li, Y., Pan, S., Ning, S., Shao, L., Jing, Z., & Wang, Z. (2022). Coal measure metallogeny: Metallogenic system and implication for resource and environment. *Science China Earth Sciences*, 65, 1211–1228.
- Lin, R.; Soong, Y.; Granite, E. J. (2018). Evaluation of trace elements in U.S. coals using USGS COALQUAL database version 3.0. Part II: Non-REY critical elements. *International Journal of Coal Geology*, 192, 39–50.
- Mann, M. D., Theaker, N. L., Rew, B. J., Benson, S. A., Benson, A., Palo, D., Haugen, C., & Laudal, D. (2021). Investigation of Rare Earth Element Extraction from North Dakota Coal-Related Feedstocks (Phase 2 Final Technical Report). (DOE Report). *U.S. Department of Energy*. <https://doi.org/10.2172/1785352>
- Mei, Y., Geng, Y., Chen, Z., Xiao, S., & Gao, Z. (2024). Ensuring the sustainable supply of semiconductor material: A case of germanium in China. *International Journal of Production Economics*, 271, 109231.

References

Blayda, I. A, Vasylieva, N. Yu, Vasylieva, T. V, & Slyusarenko, L. I. (2017). Dispersion analysis for optimizing the bioleaching process of

- Nassar, N. T., Shojaeedini, E., Alonso, E., Jaskula, B., Tolcin, A. (2024). Quantifying potential effects of China's gallium and germanium export restrictions on the EU economy. *U.S. Geological Survey. National Minerals Information Center*. (2025). *Germanium. Mineral Commodity Summaries*, 80–81.
- Patel, M., & Karamalidis, A. K. (2021). Germanium: A review of its U.S. demand, uses, resources, chemistry, and separation technologies. *Separation and Purification Technology*, 275, 118981.
- Patent: CN101186975B. Method for extracting germanium from lignite.
- 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 (Text with EEA Relevance). Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401252
- Resource & Analysis Center "Society and Environment". (2021). Mapping of strategic targets of Ukraine and the EU in the context of the European Green Deal: Development vectors and flagship initiatives (*Policy paper*).
- Robla, J., I., Alonso, M., Alguacil F. J. (2024). Recovery of Lesser-Known Strategic Metals: The Gallium and Germanium Cases. *Processes*, 12(11), 2545; <https://doi.org/10.3390/pr12112545>
- Rosenberg, E. (2009). Germanium: Environmental occurrence, importance and speciation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 8, 29–57.
- Rudnik, E. (2025). Challenges and opportunities in hydrometallurgical recovery of germanium from coal by-products. *Molecules*, 30(8), 1695. <https://doi.org/10.3390/molecules30081695>
- Salikhov, V. A., Strakhov, V. M., & Yedilbaev, A. I. (2021). Assessing the content of nonferrous and rare metals in nonclinkering Kazakh coal. *Coke and Chemistry*, 64, 279–283.
- Seredin, V. V., & Finkelman, R. B. (2008). Metalliferous coals: A review of main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology*, 76, 253–289.
- Shpirt, M. Y., Nukenov, D. N., Punanova, S. A., & Visaliev, M. Y. (2013). Principles of the production of valuable metal compounds from fossil fuels. *Solid Fuel Chemistry*, 47, 71–82.
- Sverdrup, H. U., Haraldsson, H. V. (2024). Assessing the long-term sustainability of germanium supply and price using the WORLD7 model. *Biophysical Economics and Sustainability*, 9, 5.
- The European Commission. (2024). European Critical Raw Materials Act: *Strengthening EU supply chains*. Brussels: European Union.
- Tossou, E. (2025). DR Congo: Gécamines starts exporting germanium from new Lubumbashi plant. *Ecofin Agency*.
- Umicore and STL Sign Partnership Related to Germanium Recycling from Big Hill's Mining Waste Materials in DRC. Umicore. Available online: <https://www.umicore.com/en/media/newsroom/umicore-and-stl-sign-partnership-related-to-germanium-recycling/>
- Wong, M., Li, J., & Zeng, X. (2025). Uncovering the germanium sustainability up to 2050 in China. *Frontiers in Environmental Science and Engineering*, 19, 25.
- Yan, T., Li, L., Zhang, Y., Hao, J., Meng, J., & Shi, N. (2024). High-performance germanium photodetectors on silicon photonics platform. *Sensors and Actuators A: Physical*, 376, 115535.
- Zhang, Y., Li, S., Li, H., Yin, S., Zhu, R., & Zhang, L. (2020). Progress in processes for extracting germanium from Ge-bearing materials. *Metallurgical Engineering*, 7(3), 163–168. <https://doi.org/10.12677/meng.2020.73023>. <https://eu4ukraine.eu/greengeal-ua>

Отримано редакцією журналу / Received: 16.01.26
Прорецензовано / Revised: 17.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Mykola BURLUTSKYY, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0009-0000-6718-3006

e-mail: Nikolay2205@i.ua

State Geology and Subsoil Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

GERMANIUM IN LIGNITE: THE EVOLUTION OF ENVIRONMENTALLY SAFE EXTRACTION TECHNOLOGIES

Background. Germanium is included in the list of critical raw materials defined by the European Union in the European Critical Raw Materials Act (2024). The deficit of germanium on the global market necessitates diversifying its supply sources and developing national technologies for extracting this element.

Future demand for germanium is expected to grow mainly due to the development of artificial intelligence (the advancement of high-performance microchips and photonic components), 5G/6G communication systems (e.g., high-speed radio and optical networks), as well as increasing demand from consumer electronics (e.g., optical fibers, IR cameras, optical components), the military and defense sectors (e.g., IR sensors, night vision systems, optical technologies), and multijunction solar cells (e.g., for space applications). According to expert estimates, 60–75 % of global germanium production originates from sphalerite rich zinc ores, with the remainder derived from coal fly ash. Other potential sources of germanium include residues from the refining of zinc, lead, copper, silver, gold, and nickel.

Coal was identified as a potential source of germanium as early as the 1930s. Today, it has become an important source of this element. Nearly two thirds of China's total primary germanium production comes from germanium bearing coal (113 t Ge in 2019), while national reserves are estimated at 6,670 t Ge (in coal ash).

Recent projections indicate a growing contribution of coal to germanium production. In particular, it is forecast that by 2200, coal may supply around 16,000 t Ge, which is comparable to the 17,000 t Ge expected from sulfide zinc ores.

Methods. The article examines the evolution of technologies for extracting germanium from lignite in the context of shaping the modern mineral resource base of Ukraine.

The main stages of the development of germanium extraction methods are analyzed: from traditional acid hydrometallurgical technologies of the mid 20th century to modern biotechnological, electrochemical, and membrane methods aimed at reducing environmental impact.

Results. The results of systematizing domestic and international studies, along with a comparison of the effectiveness of technologies across different historical periods are presented.

Research was conducted on the patterns of germanium distribution in the lignite of Zakarpattia, as well as the implementation of modern environmentally safe extraction methods based on the mining and geological conditions of rare metal mineralization and the established actual germanium contents.

Conclusions. It is established that promising areas of development include the integrated processing of lignite and ash–slag waste materials using the principles of "Zero Waste" and closed production cycles.

Using the example of the lignite deposits of Zakarpattia (Bihanske, Novoselytske), the patterns of germanium distribution were identified, and the feasibility of implementing environmentally safe extraction technologies was substantiated.

The obtained results may be used to develop national strategies in the field of critical raw materials and to prepare Ukraine for integration into the European framework for sustainable subsoil use.

Key words: lignite, germanium, critical raw material, extraction methods, environmentally safe technologies, Zakarpattia.

Автор заявляє 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 author declares 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.