


УДК 330:553(550.422)

 <https://doi.org/10.31996/mru.2024.1.35-40>

М. С. БУРЛУЦЬКИЙ, канд. геол. наук (Департамент державного геологічного контролю, Державна служба геології та надр України), Nikolay2205@i.ua, <https://orcid.org/0009-0000-6718-3006>

M. BURLUTSKYY, Candidate of Geological Sciences (Department of State Geological Control, State Geology and Subsoil Service of Ukraine), Nikolay2205@i.ua, <https://orcid.org/0009-0000-6718-3006>

ПЕРСПЕКТИВИ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЄННЯ БУРОВУГІЛЬНИХ РОДОВИЩ ЗАКАРПАТТЯ ЯК ДЖЕРЕЛА ОТРИМАННЯ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ

PROSPECTS FOR THE INTEGRATED DEVELOPMENT OF LIGNITE DEPOSITS IN ZAKARPATTIA AS A SOURCE OF CRITICAL MINERAL RAW MATERIALS

Проведено аналіз критичної мінеральної сировини на підставі Звіту Міністерства енергетики США (DOE) “Оцінка критичних матеріалів”, що був виданий в США в липні 2023 р., а також Методології визначення критичної мінеральної сировини в Європейській Раді (2017 р.). В Звіті DOE зазначається, що 2022 р. став рекордним роком впровадження чистих енергетичних технологій. Рекордне поширення технологій чистої енергії, таких як сонячні фотоелектричні установки й акумулятори, сприяють безпрецедентному зростанню критичних ринків корисних копалин. Цей аналіз доповнює визначення критичних корисних копалин Геологічної служби США.

В Європі першу доповідь, присвячену критичній сировині, куди було включено 14 мінералів, опублікували ще у 2011 р. Протягом наступних років модернізувалася політика щодо сталого надрокористування всередині Європейського Союзу. У 2017 р. світ побачив першу методологію щодо призначення сировини статусу “критичної”, а в січні 2018 р. – доповідь про перспективи відновлюваної промисловості в ЄС.

Логічним завершенням цього процесу стало створення ERMA – промислового альянсу в цій галузі, де сформульовано більш деталізоване визначення “критичної сировини”. Критична сировина в ЄС – це насамперед та сировина, яка є не лише економічно та стратегічно важливою для європейської економіки, але й та, виробництво якої пов’язане з високим ризиком поставок.

В статті здійснено порівняння понять критичної сировини в США та Європейському Союзі. На підставі вказаних документів проведено аналіз поточних тенденцій в сфері критичної мінеральної сировини.

Варто зазначити, що в Україні поняття “критична мінеральна сировина” або “критичні корисні копалини” до цього часу законодавством не визначено. Між тим, у липні 2021 р. Україна та Європейський Союз уклали Меморандум про стратегічне партнерство щодо сировинних ресурсів.

В нашій державі наявні близько 20 критичних корисних копалин, що містяться в переліку, зокрема, критичних для ЄС. Одним з критичних елементів як у США, так і в Європейському Союзі є германій. Наведено властивості, джерела отримання та напрями застосування германію в різних сферах сучасного життя. Проведено аналіз виконаних раніше пошуково-розвідувальних робіт на германій, що вміщують буровугільні родовища Закарпаття. Крім германію, також за результатами здійснених робіт було встановлено, що на родовищах та вуглепроявах заслуговують на увагу також інші рідкісні елементи, такі як галій, берилій, скандій, ітрій, лантан тощо.

Проведений аналіз пошуково-розвідувальних робіт на буровугільних родовищах Закарпаття вказує на те, що ці родовища вміщують багато рідкісних, зокрема і рідкісноземельних, металів, які дуже необхідні для економіки України. Великий попит на критичну мінеральну сировину, в тому числі на германій та інші види рідкісних (рідкісноземельних) металів, є підтвердженням необхідності проведення подальших пошуково-розвідувальних робіт на буровугільних родовищах Закарпаття.

Ключові слова: критичні корисні копалини, критична мінеральна сировина, рідкісноземельні метали, германій, буровугільні родовища Закарпаття.

An analysis of critical mineral raw materials was carried out based on the Report of the US Department of Energy (DOE) “Evaluation of Critical Materials”, which was issued in the USA in July 2023, as well as the Methodology for the determination of critical mineral raw materials in the European Council (2017). The 2023 Critical Materials Assessment allowed DOE to prioritize investments through research, development, and implementation for critical materials, continuing progress in science and technology innovation, coupled with an increased focus on risk mitigation and expanding commercialization technologies to create and transform domestic supply chains. The DOE Report notes that 2022 was a record year for clean energy technologies. The record-breaking proliferation of clean energy technologies such as solar PV and batteries is fueling unprecedented growth in critical mineral markets. This analysis complements the USGS definition of critical minerals.

In Europe, the first report on critical raw materials, which included 14 minerals, was published back in 2011. During the following years, the policy on sustainable subsoil use within the European Union was modernized. In 2017, the world saw the first methodology for assigning raw materials the status of critical, and in January 2018 – a report on the prospects of the renewable industry in the EU.

The logical conclusion of this process was the creation of ERMA – an industrial alliance in this field, where a more detailed definition of “critical raw materials” was formulated. Critical raw materials in the EU are primarily those raw materials that are not only economically and strategically important for the European economy, but also those whose production is associated with a high supply risk.

The article compares the concepts of critical raw materials in the USA and the European Union.

On the basis of the specified documents, an analysis of current trends in the field of critical mineral raw materials was carried out.

It is also noted that the concept of “critical mineral raw materials” or “critical minerals” has not yet been defined by legislation in Ukraine. Meanwhile, in July 2021, Ukraine and the European Union concluded a Memorandum of Strategic Partnership on Raw Materials.

In our country, there are about 20 critical minerals included in the list, in particular, critical for the EU. One of the critical elements, both in the USA and in the European Union, is germanium. Properties, sources of production and directions of application of germanium in various spheres of modern life are given. An analysis of previously performed search and exploration works on germanium containing lignite deposits of Zakarpattia was carried out. In addition to germanium, also based on the results of these works, it was established that other liquid elements such as gallium, beryllium, scandium, yttrium, lanthanum, etc. deserve attention in deposits and coal deposits.

The analysis of prospecting and exploration works on the lignite deposits of Transcarpathia indicates that these deposits contain many liquid, in particular, rare earth metals, which are extremely necessary for the economy of Ukraine. In addition, this is a powerful potential for the export of these metals, primarily to European countries, as well as to other countries of the world.

The great demand for critical mineral raw materials, in particular for germanium and other types of liquid (rare earth) metals, is a confirmation of the need for further prospecting and exploration work in the lignite deposits of Zakarpattia.

Keywords: *critical minerals, critical mineral raw materials, rare earth metals, germanium, lignite deposits of Zakarpattia.*

Вступ

За якими критеріями та чи інша мінеральна сировина потрапляє до категорії “критична”? Методологія виокремлення “критичної сировини” розроблена ще у 2008 р. у США і побудована на трьох таких ознаках: 1) можливість заміщення іншим видом сировини; 2) функціональна незамінність; 3) ризик поставок. Це фактично ті маркери, які дозволяють ту чи іншу корисну копалину відносити до переліку “критичних” [7].

Проте в Україні поняття “критична мінеральна сировина” або “критичні корисні копалини” до цього часу законодавством не визначено. Між тим, у липні 2021 р. Україна та Європейський Союз уклали Меморандум про стратегічне партнерство щодо сировинних ресурсів.

В нашій державі наявні близько 20 критичних корисних копалин, що містяться, зокрема, в переліку критичних для ЄС. Одним з таких металів, що є критичним, в тому числі і для України, є германій, оксиди якого раніше вилучалися під час коксування вугілля на Авдіївському, Алчевському та інших коксохімічних заводах, а потім шляхом гідролізу отримували сам метал на Северодонецькому хіміко-металургійному заводі [3].

В інших країнах поняття “критичної мінеральної сировини” (“критичних корисних копалин”) визначаються, виходячи з вимог національного законодавства, кон’юнктури ринку, галузевої методики оцінки, можливості заміни тих чи інших корисних копалин на підставі ідентичності їх властивостей, останніх тенденцій до необхідності використання різноманітних матеріалів (сировини) з метою їх відповідності технологіям чистої енергії тощо. Так, Міністерство енергетики США в липні 2023 р. видало Звіт “Оцінка критичних матеріалів” [9] (далі – Звіт). В ньому зазначається, що протягом понад десяти років Міністерство енергетики США (далі – DOE) 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 DOE щодо критичних матеріалів у 2010 р. В даній Стратегії першу оцінку критичних матеріалів проведено DOE – визначення того, які матеріали є критичними для технологій чистої енергії.

Оцінка критичних матеріалів 2023 року дозволила DOE визначити пріоритети для інвестицій через дослідження, розробку та впровадження для критичних матеріалів, продовжуючи прогрес у науково-технічних інноваціях у поєднанні з розширеним фокусом на зниженні ризиків і розширенні технологій комерціалізації для створення та трансформації внутрішніх ланцюгів постачання.

Цей аналіз доповнює визначення критичних корисних копалин Геологічної служби США (далі – USGS) у таких аспектах:

По-перше, оцінка Міністерства енергетики (DOE) виконується з глобальної точки зору, тоді як аналіз Геологічної служби США (USGS) зосереджується на важливості корисних копалин для економіки країни.

По-друге, цей Звіт фокусується на важливості матеріалів для технологій чистої енергії, а не для економіки загалом.

Нарешті, ці дослідження спрямовані до 2035 року на основі напрямів розширення використання чистої енергії, тоді як оцінка USGS є ретроспективною.

Матеріали, оцінені в звіті DOE, не відображаються у переліку критичних корисних копалин США USGS, такі як мідь, уран і карбід кремнію.

Відповідно до Закону США про інфраструктуру USGS отримала фінансування для своєї Ініціативи з картографування ресурсів Землі, яка оновить національне картографування цих корисних копалин, включаючи ті, що все ще залишаються у землі та присутні у відходах шахт.

Між тим, Закон про енергетику 2020 року розширив повноваження Міністерства енергетики щодо вирішення проблем із критичними матеріалами за допомогою Програми дослідження, розробки та комерціалізації критичних матеріалів. Також цей Закон зобов’язав USGS оновити список критично важливих корисних копалин, і вказана вимога є своєчасною. Крім того, згідно з зазначеним законодавчим документом, надано додаткове фінансування для виконання цих робіт як для USGS, так і для інших установ.

З 2019 р. значні події на ринку змінили картину критичності матеріалів. Світ став свідком глобального сплеску впровадження електромобілів, що призвело до збільшення попиту на такі життєво важливі компоненти, як літій-іонні батареї, рідкісноземельні магніти, електротехнічна сталь і силова електроніка.

Важливі мінерали, необхідні для низки технологій чистої енергії, за останні роки постали на порядок денний.

Швидке зростання попиту відкриває нові можливості для галузі, але ці тенденції поєднані з постійним коливанням цін, вузькими місцями у ланцюзі поставок та геополітичними проблемами, що створило потужну суміш ризиків для безпеки та необхідності швидких енергетичних перетворень.

Варто зазначити, що основними висновками цього Звіту у 2023 р. є наступне: рідкісноземельні матеріали (неодим, празеодим, диспрозій і тербій), які використовуються в магнітах електродвигунів і генераторів вітрових турбін, залишаються критичними.

У той же час як кобальт був визнаний критичним у цьому та попередніх звітах, літій стає критичним у середньостроковій перспективі через його більш широке використання в різних хімікатах акумуляторів та стрімке зростання індустрії електромобілів.

Природний графіт є новим доповненням до цієї оцінки, і він також визнаний критичним.

Метали платинової групи, які використовуються у водневих електролітах, такі як платина та іридій, є критично важливими через підвищену увагу до водневих технологій для досягнення нульових викидів вуглецю.

Галій залишається критично важливим через його використання у світлодіодах (LED). Крім того, використання галію зросло у виробництві магнітів і напівпровідників у таких формах, як арсенід галію (GaAs) або нітрид галію (GaN).

Оскільки впровадження чистої енергії досягає нових рекордів, корисні копалини для перетворення енергії стають основними на ринках гірничодобувної промисловості та металів.

В Звіті зазначається, що 2022 р. став рекордним роком впровадження чистих енергетичних технологій. Рекордне поширення технологій чистої енергії, таких як сонячні фотоелектричні установки й акумулятори, сприяють безпрецедентному зростанню критичних ринків корисних копалин.

Ще у 2022 р. продажі електромобілів зросли на 60 % і перевищили 10 млн одиниць. Навіть системи зберігання енергії

більш швидко зростали з подвоєнням потужностей у 2022 р. Сонячні установки продовжували бити попередні рекорди, а вітроенергетика поновила своє висхідне зростання після двох невдалих років. Це призвело до значного збільшення попиту на найважливіші корисні копалини.

З 2017 по 2022 р. попит з боку енергетичного сектору став головним фактором зростання втричі загального попиту на літій, 70 % стрибку попиту на кобальт і 40 % зростання попиту на нікель.

У 2022 р. частка застосування чистої енергії у загальному попиті досягла 56 % на літій, 40 % на кобальт і 16 % на нікель порівняно з 30 % для літію, 17 % для кобальту та 6 % для нікелю п'ять років тому.

Під впливом зростання попиту та високих цін об'єм ринку є ключовим за останні п'ять років, кількість корисних копалин для перетворення енергії подвоїлася, досягнувши 320 млрд дол. США у 2022 р.

Це контрастує зі скромним зростанням на такі мінерали, як цинк і свинець. В результаті відбувається трансформація корисних копалин, які раніше були невеликим сегментом ринку, а зараз посідають центральне місце в гірничодобувній та металургійній промисловостях.

Переважає більшість електромобілів, які виробляються сьогодні, використовують неодим-залізо-бор (NdFeB) магніти. Рідкісноземельні мінерали використовуються в магнітах в електричних транспортних засобах і вітрових турбінах. Зі стрімким зростанням попиту на електромобілі виробництво цих магнітів стало одним із найспоживаніших ключових рідкісноземельних металів неодиму, празеодиму та диспрозію. Інші матеріали, що використовуються в цих магнітах, включають галій, кобальт, бор і залізо.

В Європі визначенню понять “критична мінеральна сировина” (“критичні корисні копалини”) надають великого значення. Перша доповідь, присвячена критичній сировині, куди було включено 14 мінералів, була опублікована ще у 2011 р. Протягом наступних років модернізувалася політика щодо сталого надкористування всередині Європейського Союзу.

У 2017 р. світ побачив першу методологію щодо визначення сировини статусу “критичної”, а в січні 2018 р. – доповідь про перспективи відновлюваної промисловості в ЄС.

Логічним завершенням цього процесу стало створення ERMA – промислового альянсу в цій галузі, де сформульовано більш деталізоване визначення “критичної сировини”.

Критична сировина в ЄС – це насамперед та сировина, яка є не лише економічно та стратегічно важливою для європейської економіки, але й та, виробництво якої пов'язане з високим ризиком поставок [10].

Тобто, для визначення критичності матеріалу для ЄС використовуються два основних параметри: економічна важливість (EI) і ризик постачання (SR). Перелік критичної сировини встановлюється на основі оціненої сировини, яка досягає або перевищує порогові значення для обох параметрів, визначених Європейською Комісією. Немає порядку ранжування сировини за критичністю. Розрахунки базуються на середніх даних за останні п'ять років. Для різних параметрів враховується пріоритет, якість і доступність даних.

Матеріали, які використовуються в “зелених” технологіях, побутовій електроніці, охороні здоров'я, сталеплавильній промисловості, оборонному комплексі, дослідженнях космосу та авіації, є не лише критично важливими для ключових галузей промисловості та майбутнього застосування, а й для стійкого функціонування європейської економіки. Важливо зауважити, що ці матеріали вважаються дефіцитними, а тому класифікуються як “критичні”, оскільки вони мають:

1) суттєве економічне значення для ключових галузей європейської економіки, таких як побутова електроніка, еколо-

гічні технології, автомобільна, аерокосмічна, оборонна, медична та сталева промисловості;

2) високі ризики для ланцюгів постачання через високу частку імпорту та високий рівень концентрації критичної сировини в окремих країнах.

Для них не вистачає актуальних (життєздатних) замінників через надзвичайно унікальні та стійкі властивості цих матеріалів для теперішніх, а також майбутніх способів застосування.

Оцінка критичної сировини, проведена ЄС, дозволила розглядати неенергетичну сировину як економічно важливу та з урахуванням ризику постачання до країн ЄС ще у період 2016–2020 рр.

Незважаючи на подібність, оцінки DOE дещо відрізняються. Зокрема, вони зосереджені саме на важливості матеріалів для енергетики та технологій декарбонізації та виконуються з прицілом на майбутнє.

Оцінки критичності DOE є прогнозними, оскільки вони включають тенденції попиту на основі сценаріїв зростання для різних енергетичних технологій у поєднанні з припущеннями щодо матеріаломісткості цих технологій. Зокрема, кожен із цих Звітів містить оцінку критичності для короткострокової (0–5 років) та середньострокової (5–15 років) перспектив.

У 2020 р. Єврокомісія випустила інформаційний бюлетень, в якому був представлений список із 30 корисних копалин (серед них наявні в Україні титан, літій, марганець, графіт, берилій тощо), що є або стануть критично важливими для європейської економіки.

До речі, у 2021 р. Україна входила до десятки країн, лідируючих за видобутком титану, залізної руди та каоліну, марганцю, цирконію, графіту, а також мала запаси літію, берилію, рідкісноземельних елементів, нікелю і кобальту.

“Критична сировина” є особливо важливою для мегасекторів промисловості ЄС та для широкого кола комерційних та державних програм: екологічна технологія, телекомунікації, дослідження космосу, аерофотографування, авіація, медичні прилади, мікроелектроніка, транспорт, оборона та інші високотехнологічні товари та послуги. Як результат, промисловість ЄС, навколишнє середовище та якісний, сучасний спосіб життя залежать від доступу та використання цих важливих сировинних матеріалів [10].

Щоб створити сучасний літак, потрібно близько 80 металів. Серед них можна виділити критично рідкісні метали, важливі для високотехнологічної промисловості: вісмут, кобальт, літій, галій, германій, іридій, літій, паладій, платина.

Германій: властивості, джерела отримання та застосування

Одним з критичним елементів як у США, так і в Європейському Союзі є германій. Варто зазначити, що у 1930-х роках германій і галій були виявлені в кам'яному вугіллі. До Другої світової війни германій майже не знаходив застосування в промисловості.

Дослідженнями, проведеними під час Другої світової війни, було встановлено, що ультрачистий германій за своїми електричними властивостями є найкращим матеріалом для утворення напівпровідникових приладів. Виходячи з цього, він дуже скоро посів провідне місце у виробництві електронних приладів.

У 1945 р. уперше був створений германієвий діод з високою зворотною напругою, а через три роки – транзистор з германію. Цьому передувала величезна робота по вивченню властивостей цього елемента, і нині германій є одним з найбільш вивчених хімічних елементів. Особливо детально вивчені електрофізичні властивості германію залежно від способу отримання, термообробки, наявності домішок.

До 1956 р. головним виробником та споживачем були США, зокрема в 1961 р. США було вироблено 18 144 кг, проте вже в 1960 р. першість виробництва германію перейшла до

Бельгії, яка того року виробила 25 т германію за рахунок найбільших джерел германію (родовищ германію) Тсумб в Південно-Західній Африці та Принц Леопольд у Конго.

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 в пиловловлювачах і димарях разом з леткими компонентами золи. При цьому понад 60 % германію виноситься разом з газами та осідає в пиловловлювачах і димарях.

Нині основними джерелами промислового отримання германію слугують відходи цинкового виробництва і коксування кам'яного вугілля, уловлюваний пил газових заводів і генераторних установок, а також германієві концентрати, що отримуються з мідно-свинцево-цинкових сульфідних руд.

Германій має структуру типу алмазу, в елементарній комірці міститься 8 атомів, густина – 5,323 г/см³, температура плавлення – 9370 °С. Власна провідність визначається концентрацією електронів і дірок [8]. Питома електропровідність – 0,01 Ом/см², вона змінюється в широких межах за рахунок домішок. Чистий германій має металевий блиск, досить твердий. Відрізняється він великою крихкістю: при легкому ударі молотком розсипається на шматки.

Германій відноситься до IV групи Періодичної системи і є першим представником елементів підгрупи германію. Кремній і германій – одні з перших напівпровідників, їх можна вважати класичними. У ряді напруги германій розташований після водню – між міддю і сріблом. Він не взаємодіє з водою і не розчиняється в розбавленій і концентрованій соляній кислоті. Гаряча концентрована сірчана кислота повільно розчиняє його з виділенням SO₂ і Ge(SO₄)₂.

Двоокис германію помітно розчиняється у воді, даючи германієву кислоту H₂GeO₃, не виділену у вільному стані. Водні розчини GeO₂ добре проводять електричний струм. Двоокис вазжко розчиняється в кислотах, але дуже легко переводиться в розчин лугами з утворенням солей германієвої кислоти – германат.

Чутливість германію до високих впливів тепла, світла, радіоактивних випромінювань, магнітних та електромагнітних коливань відкрили йому широку дорогу для виготовлення різних напівпровідникових приладів та апаратів, що використовуються в теплотехніці, техніці інфрачервоних променів, дозиметрії, термометрії та інших сферах техніки.

Серед інших напівпровідникових матеріалів германій за своїми електричними властивостями поступається лише монокристалічному кремнію. Однак частота кремнію повинна бути вищою (приблизно в 10 разів), ніж допускається для германію.

Для напівпровідникової техніки становлять найбільший інтерес тверді розчини заміщення на основі германію і кремнію. З цієї точки зору більшість легуючих компонентів у германії і кремнії мають так звану зворотну розчинність або ретроградний солідус [8].

Винахід германієвого діоду, а потім триоду докорінно розширив межі його застосування.

У подальшому досягнуті успіхи у виготовленні германієвих випрямлячів привели до широкого застосування германію в електротехніці.

В США виготовлення германію почалося в 1942 р. (менш ніж 4,5 кг) і досягло у 1959 р. вже 20 000 кг рафінованого металу. Основним джерелом його отримання стали побічні продукти, що утворювалися при виплавці цинкових руд, які вміщують від 0,703 до 0,07 % германію. Крім цього, деяка частина германію вилучалася з вугільної золи. На той час вважалося, що вигідно було вилучати германій з вугільної золи при його вмісті не

менш ніж 0,05 %. Дослідження ряду вугільних пластів показало, що в деяких випадках вартість германію, що вміщується у вугіллі, іноді вище за вартість самого вугілля. Саме тоді в США був знайдений германієвий лігніт з вмістом до 6 % германію.

Сировиною для германієвої промисловості Англії став вугільний пил газогенераторних установок, вміщуючих германій до 0,5 %.

Одне з найвідоміших родовищ германію (з 1918 р.) розташовано в північній частині Південно-Західної Африки в районі Цумб. Германій знаходиться тут у вигляді германію та ренкериту, які є супутніми мінералами мідних, свинцевих та цинкових руд. У переробку йшли руди з середнім вмістом 0,15 %. Германієві флотаційні концентрати направлялися головним чином до Бельгії для отримання двоокису та металічного германію.

В Японії концентрації германію відмічені на північному заході острова Сікоку, де його вміст у лігнітах складає близько 0,5 %. Такий же вміст германію спостерігається у вугіллі на острові Хоккайдо, тому основною сировиною для його отримання є вугілля.

Ціна на металічний германій в США в 1958 р. була 485 дол. за 1 кг.

В колишньому Радянському Союзі перша установка по вилученню германію була отримана в Одесі до початку Другої світової війни.

В повоєнні роки промислове вилучення германію здійснювалося із продуктів коксохімічного виробництва.

Водночас у двох напрямках проводилися науково-дослідні роботи по вилученню германію з енергетичного вугілля.

У першому варіанті вивчалися можливості уловлювання цього елемента при спалюванні вугілля в топках, з подальшим збагаченням золи в циклонних печах. На той час промислові установки, засновані на цьому принципі, були побудовані в районі Лисичанська. Для спалювання придатне вугілля із вмістом 5–10 г/т.

У другому варіанті інститутом “ВНДІвуглезбагачення” було розроблено метод глибокого збагачення германієносного вугілля з доведенням концентрації германію до 1000 г/т, тобто одержання вугільного концентрату. Цей метод використовувався для вугілля з низьким вмістом германію, але вартість германію при цьому була дуже високою.

В колишньому Радянському Союзі в 1961 р. було видобуто 9 т германію, причому переважна кількість була отримана коксохімічним виробництвом, проте ціна вилучення германію була доволі високою. У зв'язку з цим було поставлено завдання щодо отримання германію з енергетичного вугілля.

Германій використовується в основному для волоконно-оптичних систем та інфрачервоної оптики. Він також застосовується для каталізаторів полімеризації, електроніки, а також люмінофорів, металургії та хіміотерапії. Оскільки діоксид германію має високий показник заломлення та низьку оптичну дисперсію, він корисний для ширококутних об'єктивів камер.

Питання германієносності кам'яного вугілля досліджували багат авторів [1, 3, 7 та ін.]. Аналіз германієносності буровугільних родовищ та проявів Закарпаття здійснювався лише за результатами проведених пошуково-розвідувальних та випробувальних робіт протягом 50–80-х років ХХ ст.

Постановка задачі, об'єкт досліджень

Метою роботи є вивчення геологічних, геохімічних та інших особливостей буровугільних родовищ Закарпаття, встановлення закономірностей розподілу германію, інших рідкісноземельних металів, які відносяться до критичної сировини.

Крім того, на підставі аналізу попередніх пошуково-розвідувальних робіт визначено основні напрями проведення подальших геологорозвідувальних робіт з метою виконання геолого-економічної оцінки комплексних буровугільних родовищ Закарпаття, здійснення оцінки якості та технологічних властивостей критичної сировини, що вміщує буре вугілля.

У роботі використані результати попередніх досліджень (1950–1980-х років), проведених, зокрема, Закарпаською геологічною експедицією (ГРЕ), Київським геологорозвідувальним трестом.

Надаються відомості про спектрографічне визначення германію, інших рідкісних та розсіяних елементах, що трапляються в золах вугілля та вмшуючих породах, зокрема берилію, галію, скандію, ітрію, ітербію, лантану.

Буровугільні родовища Закарпаття.

Перспективи комплексного освоєння

буровугільних родовищ як джерела отримання германію та інших видів критичної мінеральної сировини

Роботи з випробування германієності бурого вугілля Закарпаття почалися Закарпатською ГРЕ в 1957 р. Проводилися вони паралельно з пошуково-розвідувальними роботами на вугіллі.

У 1958 р. за даними аналізів було встановлено, що концентрація германію в бурому вугіллі Закарпаття заслуговує більш детального вивчення. Проектом, затвердженим у 1959 р., передбачалося опробування вугілля та порід, що його вмшують на родовищах, які експлуатуються, а також опробування керна на раніше пробурених свердловинах на вугільних родовищах та опробування виходів вугілля на всіх відомих вуглепрояхах.

За результатами проведених робіт 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 УРСР протягом 1958–1959 рр.” та надана характеристика по 10 ділянках та вуглепрояхах Закарпатської області [4].

У звіті наведені результати по 2300 пробах спектрального аналізу та 100 пробах вугілля та порід, що вмшують вугілля. При цьому надаються відомості про спектрографічне визначення інших рідкісних та розсіяних елементах, що трапляються в золах вугілля та вмшуючих породах, зокрема берилію, галію, скандію, ітрію, ітербію, лантану.

В журналах спектральних аналізів звіту подана розшифровка по 25 хімічних елементах. Така кількість була вибрана не випадково, адже відповідно до діючих 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 розшифровкою 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.

Варто зазначити, що свердловини, kern яких опробувався з метою визначення рідкісних та розсіяних елементів, розташовані рівномірно в межах шахт або ділянки, що розвідувалася, і відстань між ними не перевищувала 500 м.

Встановлена в 1957 р. підвищена германієність вугілля Біганської площі, викликала необхідність здійснення на ній широких пошукових робіт.

В процесі ревізійно-випробувальних робіт на території Закарпатської області було встановлено, що підвищений вміст германію, крім вже зазначеної Біганської ділянки, має також ряд буровугільних родовищ, а саме: Новоселицьке, Ужгородське, Березнянське та Ільницьке. При цьому ще тоді було встановлено, що найбільші концентрації германію спостерігаються саме на Біганській ділянці та Новоселицькому родовищі [4].

Германій пов’язаний в основному з органічною частиною вугілля. Найвищі концентрації його приурочені до малозольних лігнітів, де він, ймовірно, накопичується під час початкової стадії вуглеутворення за наявності інтенсивних поствулканічних процесів, що відбувалися в безпосередній близькості від місць вугленакопичування.

На той час були орієнтовно підраховані запаси германію в кількості 722,5 т при вмісті германію від 3 до 1100 г/т, при середньому – 138 г/т.

На Новоселицькому родовищі тоді мали вивчати германієність вугілля під час його експлуатації. При цьому на деяких ділянках пропонувалося проводити селективну відробку збагаченого германієм вугілля.

Першочерговим завданням за результатами пошуково-випробувальних робіт було продовжити оцінку площі, що розташована поруч з Біганською ділянкою, відбір технологічних проб та проведення збагачення вугілля.

З двох технологічних методів вилучення германію з вугілля – сухого та мокрого, для Закарпаття прийнятним був мокрий, тобто вилучення з вугілля слабким розчином аміаку.

Крім германію, за результатами проведених робіт було також встановлено, що на родовищах та вуглепрояхах заслуговують на увагу й інші рідкісні елементи, такі як галій, берилій, скандій, ітрій, лантан тощо. При ревізійних роботах опробувалися не тільки свердловини, що бурилися на вугіллі, але також гідросвердловини, що виявили вугільні пласти.

На той час заслуговували на увагу берилій на ділянці Біганській, Великораковецькому родовищі, площі Гурьки Хижа; галій – на ділянці Біганській, Великораковецькому, Березнянському та Рокосовському родовищах; скандій – на ділянці Біганській, площі Береги-Онок, Рокосовському, Великораковецькому та Березнянському родовищах; ітрій – на ділянці Біганській та площі Гурьки Хижа; лантан – на ділянці Біганській.

Ванадій та стронцій було виявлено майже у всіх відібраних пробах на родовищах та вуглепрояхах Закарпаття.

У 1961 р. пошуки проводилися на площі близько 30 км². Було пробурено 19 свердловин загальним метражем 1130 п.м.

На підставі проведених робіт вдалося встановити, що найбільша вугленасиченість розрізу та найбільш високі концентрації германію приурочені до центральної та північно-західної частин площі.

Було поставлено завдання провести детальні пошукові роботи в центральній частині Біганської площі з метою з’ясування характеру та закономірностей розподілу германію у вугленосній товщі.

Польові роботи було розпочато 20 березня 1961 р. і закінчено у січні 1963 р. Було пройдено 54 свердловини загальним метражем 10 528 п.м.

У 1963 р. Закарпатською ГРЕ Київського геологорозвідувального тресту за результатами пошукових робіт 1962–1963 рр. було складено звіт “Германієність бурого вугілля Біганської площі» [5]. На площі було встановлено п’ять пластів германієносного бурого вугілля, що залягають серед осадових та пірокластичних порід середнього сармату. Потужність вугільних пластів становить від 0,5 до 3,0 м, а глибина залягання – від 120 до 180 м. У звіті подається детальна оцінка на площі близько 3 км² та перспективна оцінка на площі майже 8 км².

Підрахунок запасів германію по центральній ділянці сягнув 2654 т, а найбільших запасів германію по другому вугільному пласту – 1834 т. При цьому вміст германію у другому вугільному пласті дорівнював близько 250 г/т вугілля.

Перспектива збільшення запасів германію в цілому була сприятлива, враховуючи велику площу вугленосних відкладів, що розташовані на північ від родовища.

Крім германію, в бурому вугіллі Біганської площі було встановлено підвищені концентрації галію, свинцю, молібдену, літію, міді, лантану, ітрію, ітербію, цинку, цирконію, стронцію, рубідію і цезію.

За результатами проведеної Закарпатською ГРЕ у 1969 р. попередньої розвідки Біганського родовища германієносних лігнітів [2] (а до цього у 1963 р. пошукових робіт на Біганській площі) було встановлено, що перспективність на германій зазначених лігнітів пов'язана саме з осадами середнього сармату.

Вже тоді за результатами попередньої розвідки інститутом "Гіредмет" була виконана техніко-економічна оцінка використання лігнітів Біганського родовища з видобутку гірничої маси, збагачення гірничої маси, вилучення германію в концентрат, спалювання концентрату та вилучення германію із золи, а також металургійна переробка возгонів (пилу, що вміщує германій), враховуючи собівартість цих робіт та вартість товарної продукції (вартості германію в концентраті), розрахована рентабельність складала 23 %.

Були зроблені висновки про перспективність зростання запасів германію за рахунок збільшення площі, що на той момент розвідувалася, враховуючи велику площу вугленосних відкладів, яка розташована на північ від родовища германієносних лігнітів.

Роботами, проведеними на той час Закарпатською ГРЕ, встановлено, що підвищена концентрація германію спостерігається у вугіллі Новоселицького родовища та Біганської ділянки [6].

Родовища, що приурочені до вулканогенних утворень, пов'язані з двома фазами магматизму. З неогеновим вулканізмом пов'язані ендегенні родовища поліметалів, золота, бариту та алуніту. Ці родовища розташовані в безпосередній близькості до Біганського родовища германієносних лігнітів. З пліоценовим магматизмом пов'язані поля вторинних кварцитів з рудопроявами телуру, вісмуту, ртуті, свинцю, цинку, миш'яку.

Рентабельність виробництва германію, що була розрахована на підставі собівартості, основних та зворотних фондів, які сягали 30 % від основних та відпускної вартості германію в концентраті, складала 23 %.

Останні роботи на германій, зокрема на Біганському родовищі, виконувалися Закарпатською ГРЕ, за результатами яких у 1989 р. було складено звіт "Про попередню розвідку Біганського родовища германієносних лігнітів"[9], в якому підрахунок запасів виконано станом на 01.05.1969 р.

Висновки

Виконаний аналіз вже проведених пошуково-розвідувальних робіт на буровугільних родовищах Закарпаття вказує на те, що ці родовища вміщують багато рідкісних, зокрема і рідкісноземельних металів, які дуже необхідні для економіки України. Крім того, це потужний потенціал для експорту згаданих металів насамперед до європейських та інших країн світу.

Великий попит на ці метали, зокрема на германій та інші види рідкісних металів [1], є підтвердженням необхідності проведення подальших пошуково-розвідувальних робіт на буровугільних родовищах Закарпаття.

Вочевидь, що дослідження вмісту германію та інших рідкісних елементів (таких як галій, берилій, скандій, ітрій, лантан тощо) у районі досліджень проводилися головним чином у 1960–1970-ті роки застарілою за сьогоднішніми мірками апаратурою.

Для більш надійних оцінок промислової цінності, крім германію та інших рідкісних елементів, під час комплексної експлуатації буровугільних родовищ Закарпаття рекомендовано проводити додаткові експериментальні дослідження проб або дублікатів проб (якщо вони наявні) сучасною апаратурою та більш вдосконаленими методами.

Це може суттєво підвищити цінність буровугільних родовищ з германієвою металогенністю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бурлуцький М. С., Курило М. М. Сучасний стан ринку й перспективи розвитку мінерально-сировинної бази германію в Україні // Мінер. ресурси України. – 2012. – № 4. – С. 14–18.
2. Левитський Б. П., Мызников Д. Ф., Левитская Р. Л., Дмитриева Е. А. Отчет о предварительной разведке Беганьского месторождения германиеносных лигнитов, г. Берегово, Закарпатская геологическая экспедиция, 1969. – Т. 1. – 235 с.
3. Бучинська І. В., Матрофайло М. М., Побережський А. В., Ступка О. О., Лазар Г. І. Поширення германію у вугіллі Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну // Геол. журн. – 2023. – № 4 (385). – С. 35–49. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.284910>
4. Левитський Б. П. Отчет о результатах поисково-опробовательских работ на германий, произведенных Закарпатской экспедицией на территории Станиславской и Закарпатской областей УССР в 1958–1959 гг. – Киев: Киев. геол.-развед. трест, 1960. – Т. 1. – 111 с.
5. Левитський Б. П. Отчет о поисковых работах 1961–1962 гг. "Германиеносность бурых углей Беганьской площади", г. Берегово, Закарпатская геологическая экспедиция, 1963. – Т. 1. – 137 с.
6. Житняк М. Ю. Отчет о поисково-оценочных работах на бурый уголь по Лоховскому участку и оценка перспектив германиеносности Новоселицкого и Беганьковского месторождений бурого угля, г. Берегово, Береговская ГРЭ, 1987. – Кн. 1. – 252 с.
7. Баряцька Н. В. Поняття критичної мінеральної сировини – інструмент стимулювання розвитку надрокористування в Україні // Мінеральні ресурси України. – 2020. – № 2. – С. 13–18. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.2.13-18>
8. Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника. Лекція 5. Сучасні напівпровідникові матеріали. С. 5–36. https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2018/04/Лекція-5.-Сучасн_нап_впров_дников_матер_али.-ч.2.pdf
9. Critical Materials Assessment, U.S. Department of Energy, July 2023.
10. Methodology for establishing the EU list of Critical RAW Materials. Guidelines. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.

REFERENCES

1. Burlutskyi M. S., Kurylo M. M. The current state of the market and prospects for the development of the Germanium mineral raw material base in Ukraine // Mineral resources of Ukraine. – 2012. – No. 4. – P. 14–18. (In Ukrainian).
2. Levitskyi B. P., Myznikov D. F., Levitskaya R. L., Dmitrieva E. A. Report on the preliminary exploration of the Beganskoye deposit of germanium-bearing lignites, Beregovo, Zakarpattian Geological Expedition, 1969. – Vol. 1. – 235 p. (In Russian).
3. Buchynska I. V., Matrofailo M. M., Poberezhskiy A. V., Stupka O. O., Lazar G. I. Distribution of germanium in coal of the Lviv-Volyn coal basin // Geologichnij zhurnal. – 2023. – No. 4. – P. 35–49. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.284910> (In Ukrainian).
4. Levitsky B. P. Report on the results of prospecting and testing for germanium, carried out by the Zakarpattian expedition on the territory of the Stanislavsky and Zakarpattian regions of the Ukrainian SSR in 1958–1959. – Kyiv: Kyiv Geological Survey Trust, 1960. – Vol. 1. – 111 p. (In Russian).
5. Levitsky B. P. Report on research work in 1961–1962 "German bearing capacity of lignite in Beganskaya Square", Zakarpattian Geological Expedition, 1963. – Vol. 1. – 137 p. (In Russian).
6. Zhitnyak M. Yu. Report on exploration and assessment of lignite in the Lohovskoye area and assessment of germanium bearing prospects of Novoselytskiy and Begankovskoye lignite deposits, Berehovo, Beregovskaya GRE, 1987. – Book 1. – 252 p. (In Russian).
7. Baryatska N. V. The concept of critical mineral raw materials is a tool for stimulating the development of subsoil use in Ukraine // Mineral resources of Ukraine. – 2020. – No. 2. – P. 13–18. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.2.13-18> (In Ukrainian).
8. Prykarpattia National University named after Vasyl Stefanyk. Lecture 5. Modern semiconductor materials, 5–36. https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2018/04/Лекція-5.-Сучасн_нап_впров_дников_матер_али.-ч.2.pdf (In Ukrainian).
9. Critical Materials Assessment, U.S. Department of Energy, July 2023.
10. Methodology for establishing the EU list of Critical RAW Materials. Guidelines. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.

Рукопис отримано 15.02.2024.