

© В.І. Бондаренко¹, І.А. Ковалевська¹, О.Г. Кравченко¹, І.Д. Мовчан¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОПУТНОГО ВИДОБУТКУ РІДКІСНИХ ТА РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ВУГІЛЬНИХ РОДОВИЩАХ

© V. Bondarenko¹, I. Kovalevska¹, O. Kravchenko¹, I. Movchan¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF ADDITIONAL EXTRACTION OF RARE METALS AND RARE EARTH ELEMENTS IN COAL DEPOSITS

Мета. Визначити стан та перспективи попутного видобутку рідкоземельних елементів у вугільних родовищах Західного Донбасу

Методика досліджень. Дослідження базувалося на комплексному аналізі геолого-економічних даних щодо Західного Донбасу, літературних джерел, статистики з розподілу рідкісних та рідкоземельних елементів (РтРЗЕ) у вугільних пластах. Особливу увагу приділено петрографічному складу вугілля, глибинам залягання, вмісту германію у золі та техногенних відходах.

Результати дослідження. У статті наведено аналіз гірничо-геологічних умов залягання рідкоземельних елементів у вугільних пластах Західного Донбасу. Встановлено, що попутне вилучення РтРЗЕ з вугільної сировини є технологічно можливим і доцільним. Оцінено потенціал ресурсної бази РтРЗЕ світу та України. Розроблено схеми розподілу РтРЗЕ в вугільних пластах різної потужності та породах покрівлі, виділено першочергові зони для вилучення мінеральної сировини. Окремо проаналізовано геохімічні закономірності розподілу германію у вугільних пластах шахти "Дніпровська" (Західний Донбас). Узагальнено результати трьох незалежних досліджень, де аналізувалися кореляції між вмістом Ge та зольністю, потужністю пластів та вмістом супутніх елементів, що дозволило запропонувати роздільний видобуток вугілля і мінеральної сировини з підвищеною концентрацією РтРЗЕ.

Наукова новизна. Встановленні закономірності розповсюдження рідкоземельних елементів по потужності вугільного пласта та його покрівлі, зокрема германію – Ge, який концентрується в покрівлі та на контакті вугільного пласта. Виявлена зона підвищеної концентрації РтРЗЕ, яка знаходиться в діапазоні 0,15–0,2 м. Встановлено напрямок обґрунтування раціональних систем підготовки та розробки вугільних пластів, з урахуванням попутного видобутку РтРЗЕ.

Практичне значення. Пропонується застосування попутного видобутку РтРЗЕ при плануванні гірничих робіт. Рекомендується використання дослідження задля продовження роботи шахт в період посмайнінгу чи терміну експлуатації шахт що наближаються до закриття.

Ключові слова: рідкоземельні елементи, германій, Західний Донбас, попутний видобуток, вугільні родовища, стратегічна сировина, мінеральна сировина германій, геохімія, вугілля, кобальт, ванадій, зольність, кореляція.

Вступ. Рідкоземельні елементи (РЗЕ) та рідкісні елементи (РЕ) є незамінною сировиною для низки високотехнологічних галузей: оборонної, електронної, енергетичної. Світовий попит на РтРЗЕ стрімко зростає, особливо на фоні "зеленої трансформації" економік.

Китай протягом десятиліть залишався провідним виробником РтРЗЕ, забезпечуючи з кінця 1990-х років понад 90% світового виробництва. У 2010 році країна ввела обмеження на постачання РтРЗЕ через квоти, ліцензії та податки, аргументуючи це необхідністю задоволення внутрішнього попиту та екологічними міркуваннями. Згідно з даними Геологічної служби США (USGS), з 2021 року Сполучені Штати усунули розрив між внутрішнім ланцюжком постачання РтРЗЕ та переробними потужностями (0,3 тис. т/рік у 2022 році). Примітно, що роль Китаю змінилася з експортера на імпортера мінералів РтРЗЕ, а тепер він є переробником мінералів для США та ВЗ завдяки своїм домінуючим переробним потужностям (наприклад, 278 тис. т/рік або 83% від світового обсягу у 2022 році). Результати показують, що більшість видобутих РтРЗЕ з інших регіонів (тобто 98% з США і 76% з ВЗ у 2022 році) були відправлені до Китаю для переробки та розділення, а потім повернулися для задоволення попиту в якості перероблених продуктів РтРЗЕ [1, 2].

Світовий видобуток рідкісноземельних металів на основі даних Геологічної служби США (USGS), модифікованих з урахуванням австралійського виробництва, оцінювався в 170 000 т РЗМ у 2018 році. Австралія посіла друге місце у світі за обсягами видобутку завдяки видобутку на руднику Маунт-Велд корпорації Lynas у Західній Австралії. Пробний видобуток і переробка на проєкті Browns Range компанії Northern Minerals Ltd, також у Західній Австралії, забезпечили невеликий внесок у австралійський видобуток [3].

В Індії монацит є основним джерелом рідкісноземельних елементів і торію. Монацит – це складний фосфат торію і рідкісноземельних мінералів [(Ce, La, Nd, Th, Y) PO₄], який є радіоактивним за своєю природою. Мінерал монацит є речовиною, що підлягає регулюванню згідно з повідомленням відповідно до Закону про атомну енергетику 1962 року. AMD проводить оцінку його ресурсів вже понад шість десятиліть. Він зустрічається в асоціації з іншими важкими мінералами, такими як ільменіт, рутил, циркон тощо, у концентраціях 0,4–4,3% від загальної кількості важких мінералів у пляжних і внутрішніх розсипних родовищах країни. Станом на березень 2021 року прогнозовані ресурси монациту в прибережних і внутрішніх розсипних родовищах оцінюються в 12,73 млн тон [4].

Водночас Україна, володіючи значним потенціалом у галузі видобутку РтРЗЕ, досі не реалізувала наявні можливості повною мірою. При цьому Україна володіє значними запасами та перспективними ресурсами рідкісних металів. Основні родовища та рудопрояви розташовані в межах трьох субпровінцій Українського щита – північно-західної, центральної та південно-східної. За обсягами запасів і перспективних ресурсів багато українських рідкіснометалевих родовищ належать до середніх і великих. На рис. 1 зображено приблизне розташування скупчень родовищ РтРЗЕ України.

До унікальних і великих родовищ належать передусім такі: Пержанське родовище берилію, Азовське родовище рідкісних земель і цирконію, Мазурівське – ніобію, танталу й цирконію, Полохівське родовище літію, Мостове – танталу, Новополтавське – комплексних фосфорно-рідкісноземельно-рідкіснометалевих руд та ін.

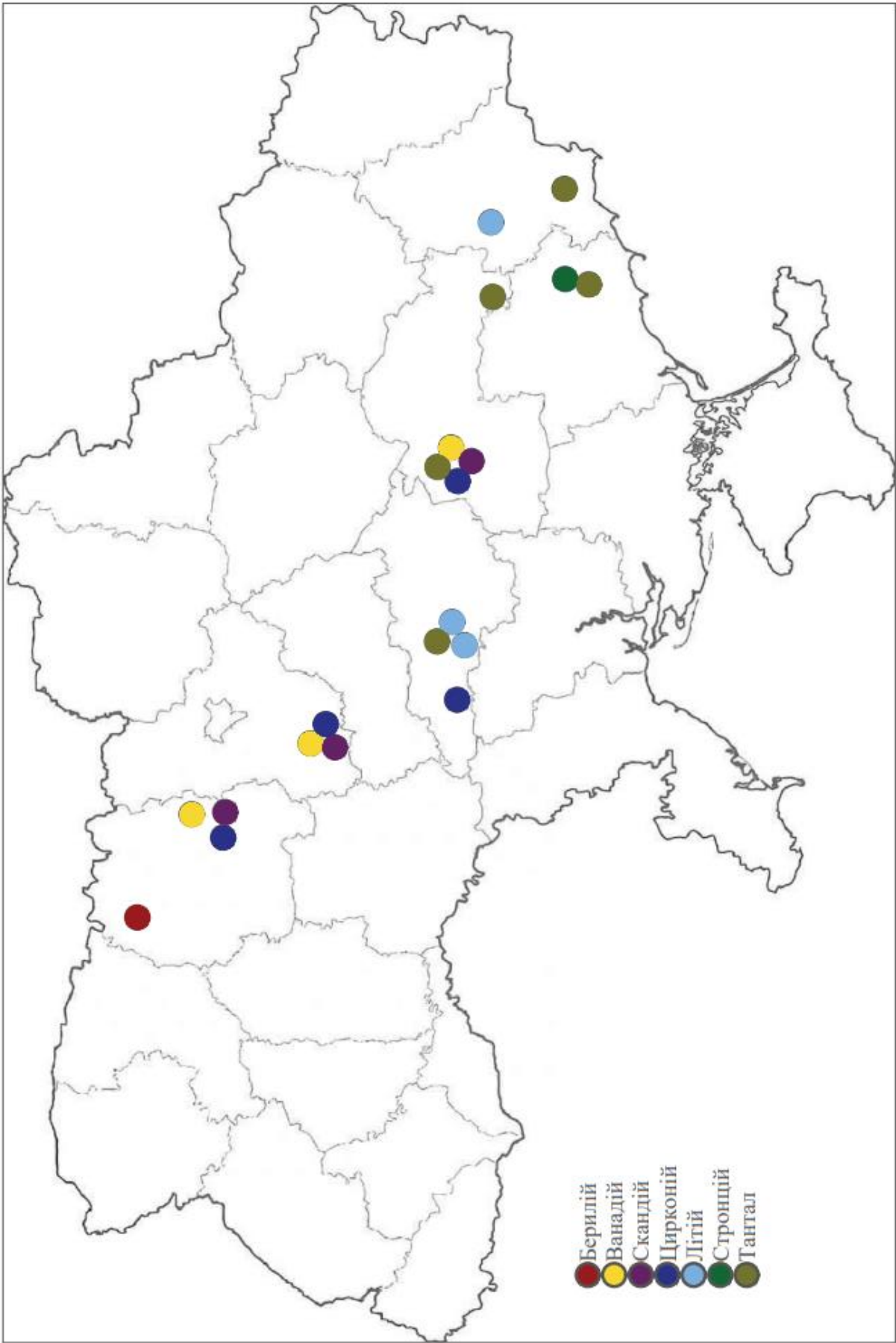


Рис.1. Скупчення родовищ РтP3E України

Особливий інтерес становлять попутні джерела РтРЗЕ, зокрема у вугільних пластах. Західний Донбас - один із найбільш перспективних регіонів, де вугільні родовища містять значні концентрації германію, ванадію, цирконію.

Вугільні пласти Західного Донбасу характеризуються потужністю 0,6–1,2 м і залягають на глибинах до 800 м. Вугілля має високий вміст органічної речовини та золистість, що є сприятливим фактором для накопичення германію у концентраціях 2–23 г/т. Вміст ванадію досягає 220 г/т, а цирконію – 100–150 г/т. Вугілля Західного Донбасу, окрім основних компонентів, містить також різні мікроелементи, включаючи рідкісні. Зокрема, у вугільних пластах району спостерігається спільна концентрація таких елементів, як кобальт (Co), нікель (Ni), свинець (Pb), хром (Cr), ванадій (V) та марганець (Mn), які утворюють геохімічну асоціацію. Ці елементи накопичуються в приконтартових ділянках вугільних пластів, як у покрівлі, так і в підшві, формуючи зони збагачення потужністю 0,15–0,2 м [5–7].

Розробка таких джерел дозволяє поєднати класичний видобуток вугілля із вилученням стратегічної сировини. Тонкі вугільні пласти, зокрема з високим вмістом рідкоземельних елементів, можуть мати ще один важливий аспект у вигляді золи виносу, яка утворюється в процесі спалювання вугілля або його переробки. Зола виносу є побічним продуктом горіння вугілля та часто містить в собі значні концентрації рідкоземельних елементів, таких як германій, кобальт, ванадій та інші метали, що мають стратегічне значення для багатьох галузей промисловості.

Процес утворення золи виносу з тонких вугільних пластів дозволяє не тільки використовувати вугілля як енергетичний ресурс, а й забезпечує додаткову сировинну базу для видобутку РтРЗЕ. У цьому контексті важливо розглядати золу виносу як один із важливих джерел для екстракції рідкоземельних елементів. Тонкі пласти, в яких зберігаються високі концентрації таких елементів, у поєднанні з процесом їхнього спалювання можуть забезпечити значну кількість цінних металів, що містяться в золі виносу.

Зола виносу з тонких пластів, де концентрація РтРЗЕ стабільна, дає можливість ефективно застосовувати методи екстракції цих елементів, не вимагаючи складних і дорогих технологій видобутку. Завдяки стійким хімічним асоціаціям рідкоземельних елементів з органічними та неорганічними компонентами вугілля, зола виносу стає доступним джерелом для вилучення таких елементів, як германій і кобальт, за допомогою технологій пірометалургії або гідрометалургії. Важливою перевагою цього підходу є можливість одночасного вилучення кількох елементів з золи виносу, що дозволяє оптимізувати процеси та знижує витрати на окрему обробку кожного елементу. Завдяки комплексному підходу до переробки золи виносу з тонких пластів можна досягти високої ефективності при видобутку РтРЗЕ та інших цінних металів, таких як ванадій і кобальт [8–14].

Отже, видобуток рідкоземельних елементів з тонких пластів вугілля, а також їх додаткове вилучення з золи виносу, відкриває нові можливості для підвищення економічної ефективності видобутку стратегічних металів. Цей комплексний підхід сприяє зниженню витрат, зменшенню ризиків при геологорозвідувальних роботах і дозволяє максимально використовувати наявні ресурси. В результаті, цей процес може значно посилити роль таких родовищ у забезпеченні

потреби в рідкоземельних елементах для різних галузей промисловості, від енергетики до високих технологій, і тим самим сприяти розвитку національної економіки та зростанню її конкурентоспроможності.

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

Ванадій у промислових концентраціях виявлений у ільменітах апатит-ільменітових родовищ, ільменітових розсипах, корінних уран-ванадій-скандієвих рудах Українського щита, а також у бурих залізнях Керченської групи родовищ. В Україні виробництво концентратів ванадію відсутнє, а потреби народного господарства задовольняються за рахунок імпорту. За даними державного балансу запасів корисних копалин, враховуються запаси ванадію (в перерахунку на п'ятиокис) у дванадцяти комплексних родовищах. Серед вторинних джерел ванадію особливу увагу привертають відходи українських нафтопереробних і титанових підприємств, а також золи теплоелектроцентралей і теплоелектростанцій, особливо тих, що працюють на мазуті. Щодо германію, його концентрації в Україні пов'язані переважно з кам'яновугільними родовищами Донецького та Львівсько-Волинського басейнів, що створює перспективи для його отримання як супутнього компонента при переробці вугілля [5, 15].

Оцінка запасів германію у шахтах Західного Донбасу сягає понад 90 тис. тон. За поточних ринкових цін (~1300–1500 \$/кг), потенційна вартість ресурсної бази перевищує 100 млн доларів США. Враховуючи можливість переробки техногенних відходів (золи ТЕС), ресурсна база може бути значно розширена [15].

Перспективним напрямом є гідрометалургійне вилучення германію з золотшлакових матеріалів з використанням кислотного або амонійного вилуговування, а також сорбційних методів. Для вилучення ванадію та титану досліджуються лужно-карбонатні схеми та комплексна гідрохімічна переробка.

Модельний розрахунок для середньої шахти Західного Донбасу демонструє потенційну рентабельність проєкту до 18–25 % при терміні окупності 6–9 років. У випадку застосування державного стимулювання – цей термін може бути скорочений до 4–6 років. При цьому додатковим плюсом є екологічний ефект – зниження вмісту токсичних компонентів у зольних відходах.

Попередні дослідження, виконані у межах Західного Донбасу, зокрема на шахті «Дніпровська», засвідчують наявність германію в концентраціях, які можуть бути перспективними для вторинного вилучення. Однак, для обґрунтованого прогнозування таких скупчень необхідно виявити чіткі геохімічні закономірності — зокрема залежності між вмістом германію та зольністю, потужністю пластів, а також концентрацією супутніх елементів, таких як кобальт і ванадій.

Аналіз останніх публікацій [16–18] свідчить про наявність кореляцій між германієм і супутніми елементами, однак питання комплексного узагальнення цих результатів з урахуванням просторових та стратиграфічних факторів залишається відкритим.

У межах дослідження було проаналізовано результати трьох незалежних геохімічних розвідок, проведених у вугільних пластах шахти «Дніпровська» Західного Донбасу. Основну увагу зосереджено на пластах c^H_8 та c^B_{10} , де зафіксовано наявність германію в концентраціях, що перевищують фонові значення для регіону. Встановлено, що зольність вугілля відіграє важливу роль у процесах акумуляції германію. Зокрема, у дослідженні Ішкова В.В. та Козія Є.С. [16–18] виявлено статистично значущий, хоча й помірний обернений кореляційний зв'язок між вмістом германію та зольністю вугілля ($r = -0,12$) у пласті c^H_8 . Найбільші концентрації германію (до 6,3 г/т) спостерігалися при зольності у межах 5–10%, що дозволяє говорити про наявність умовного «сорбційного оптимуму» – інтервалу зольності, за якого вміст германію є найбільш стабільним і підвищеним.

Паралельно було розглянуто вплив потужності пластів на варіативність вмісту германію. Дані свідчать про наявність тенденції зростання концентрацій Ge при зменшенні потужності пласта, особливо за значень менше 0,4 м. Це пояснюється тим, що у тонких пластах, як правило, зосереджена більша частка гумусового органічного матеріалу, який має високі сорбційні властивості. Така закономірність може мати прогностичну цінність для виділення локальних зон з підвищеним вмістом германію.

Особливу увагу було в роботах [16–18] приділено встановленню геохімічних асоціацій германію з іншими елементами. У пласті c^H_8 встановлено тісний позитивний зв'язок між германієм та кобальтом ($r = 0,82$). Побудована на основі емпіричних даних регресійна модель має вигляд: $Ge = -0,4589 + 0,9839 \cdot Co$, що дозволяє з високим ступенем достовірності прогнозувати вміст германію за наявності аналітичних даних щодо концентрації кобальту. Така залежність свідчить про спільність джерела постачання або механізмів акумуляції цих елементів. Ймовірно, мова йде про сорбцію на органо-мінеральному субстраті або включення в гумусові мікрофази.

Ще вагомішою виявилася геохімічна асоціація германію з ванадієм у межах пласта c^B_{10} , де кореляційний коефіцієнт становить $r = 0,92$, що вказує на надзвичайно високий ступінь узгодженості варіації обох елементів. Відповідне рівняння регресії: $Ge = 0,0687 + 0,9219 \cdot V$, підтверджує можливість кількісного моделювання вмісту германію через параметри ванадію. Цікаво, що при цьому зольність і сірчаність у пласті не мають істотного впливу на варіацію концентрації V, що свідчить про автономність геохімічної поведінки Ge–V системи в умовах даного родовища.

На рис. 2, схематично червоним зображені зони найбільшої концентрації РтРЗЕ. На схемі можна побачити що найбільші концентрації РтРЗЕ відносяться до зони контакту пласта з навколишніми породами, та згідно досліджень відповідають +15 см навколо точки дотику пласта з породами, ця зона сировинної маси містить найбільшу кількість РтРЗЕ та представляє найбільшу цікавість для вилучення їх з вугільних пластів.

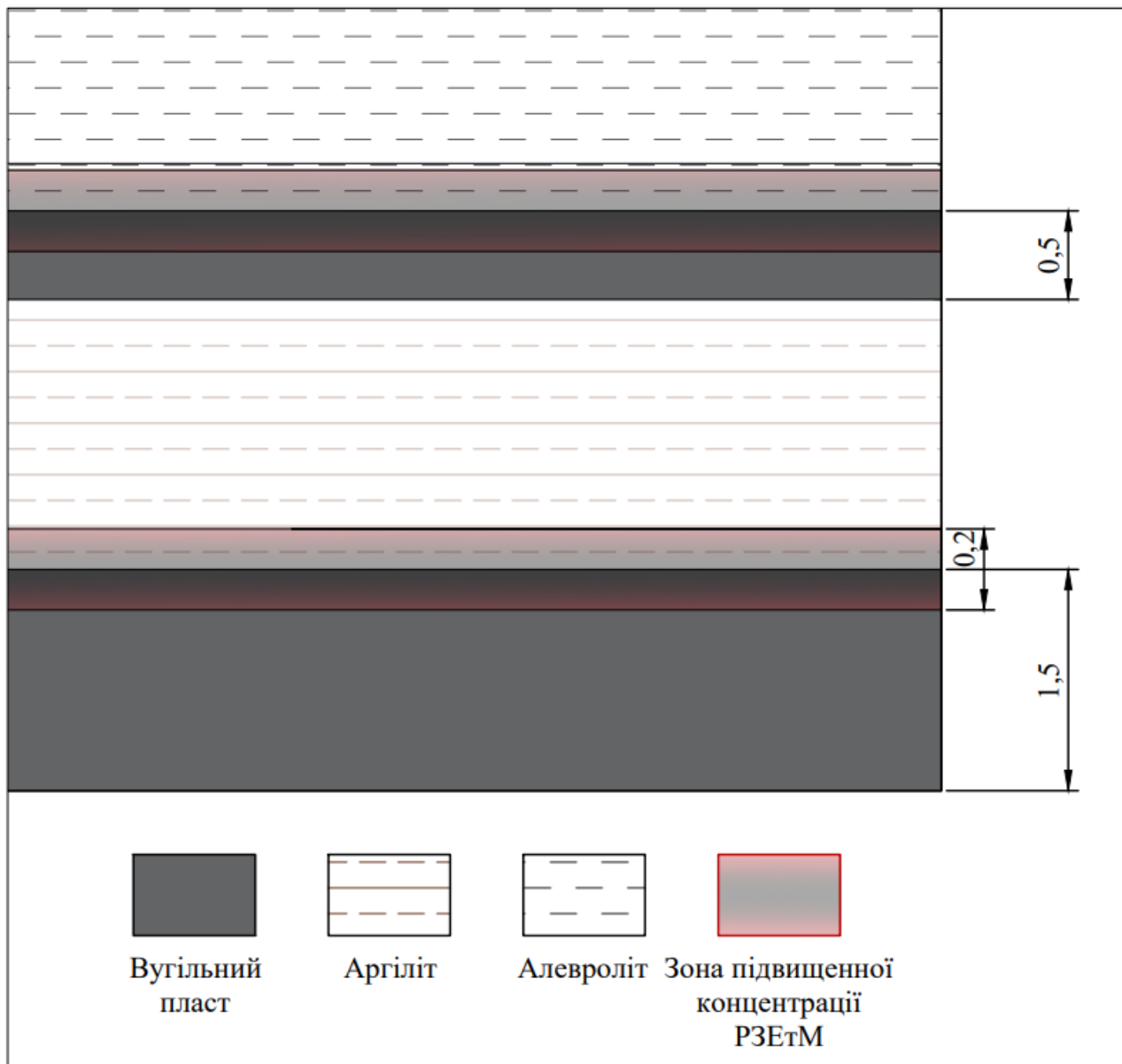


Рис.2. Схема поширення РтРЗЕ у вугільному пласті

Згідно цієї схеми, можна зробити висновок що найбільшу цікавість для вилучення РтРЗЕ мають пласти якомога тонкіші, на схемі зображені два пласти потужністю 0,5 м та 1,5 м відповідно. Пласт потужністю 0,5 м повністю віднесено до зони сировинної маси, з якої в подальшому перш за все пропонується саме вилучення РтРЗЕ, через те що пласти такої потужності на 40% складаються з сировинної маси тоді як відокремлення її від вугілля не є доцільним. Тоді як з пласта потужністю 1,5 м більш доцільним є розділення отриманої сировини на вугілля та сировинною маси що буде перероблена на РтРЗЕ

На рис. 3 зображено розповсюдження РтРЗЕ у покрівлі вугільного пласта, можна побачити як концентрація РтРЗЕ у породі при віддалені від вугільного пласта. При цьому частина вугільного пласта що знаходиться на контакті з породою є багатую на РтРЗЕ

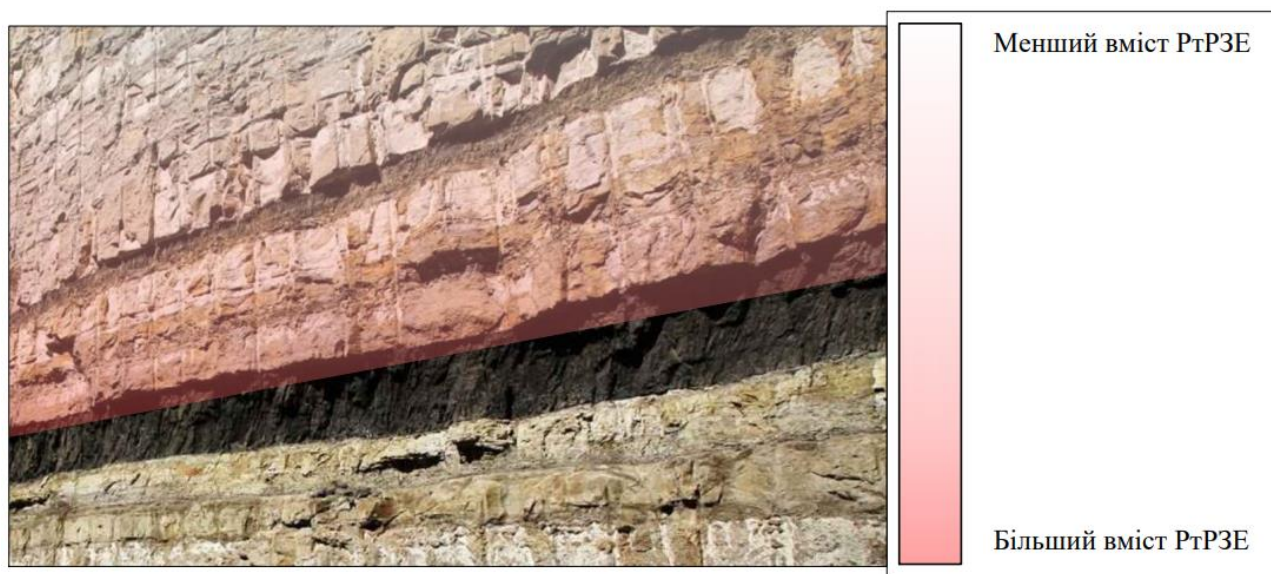


Рис. 3. Розповсюдження РтРЗЕ у покрівлі вугільного пласта

На основі виявлених [16–18] кореляційних залежностей обґрунтовано формування парагенетичних асоціацій Ge–Co та Ge–V у межах вугільної товщі. Це дає підстави розглядати кобальт і ванадій як ефективні індикатори для прогнозової оцінки потенційних зон з підвищеним вмістом германію. Практична реалізація таких індикаторів дозволить оптимізувати геологорозвідувальні роботи за рахунок скорочення обсягу прямих аналізів германію, що є дороговартісними. Крім того, запропоновані регресійні моделі можуть стати базисом для створення цифрових геохімічних моделей розподілу германію в межах шахтного поля.

Отримані результати підтверджують, що геохімічні чинники, зокрема зольність, потужність пласта, концентрації кобальту й ванадію, мають суттєвий вплив на рівень акумуляції германію. Виявлені закономірності є важливим внеском у розвиток концепції пошуків стратегічних металів у межах вугільних родовищ, зокрема в умовах України, де подібні дослідження мають обмежене поширення. З урахуванням сучасної потреби у стратегічних елементах, результати даної роботи можуть стати основою для розробки нових методик оцінки вторинної мінеральної сировини, а також впровадження комплексного використання вугілля та супутніх корисних компонентів.

Висновки.

1. Попит на видобування рідкісноземельних елементів та рідкісних металів у світі зростає і Україна має можливості задля участі у цьому процесі. Вугільні родовища Західного Донбасу містять промислово значущі концентрації РтРЗЕ, насамперед германію, ванадію, титану. Попутне вилучення РтРЗЕ з вугільної сировини та золи є технологічно можливим і доцільним. Впровадження таких технологій дозволить підвищити ресурсну ефективність шахт, зменшити екологічне навантаження та зміцнити позиції України на світовому ринку критичної сировини.

2. На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що в шахті має місце явище збільшення германію у слабопотужних пластах. Це підтверджується відомими вченими геологами Ішковим В.В. і Козієм Є.С. (НТУ “Дніпровська

Політехніка”) які дослідили високу зворотню кореляцію між товщиною вугільних пластів і їх вмістом германію, а також наявністю чітко виражених зон збагачення германієм на контактах пластів з покрівлею. Наступним кроком для отримання мінеральної сировини потрібно розробляти технологічні схеми роздільної виїмки мінеральної сировинної маси та вугілля, з метою найбільш ефективного вилучення РтРЗЕ.

3. Встановлено, що германій у вугільних пластах Західного Донбасу виявляє чітку залежність від ряду геохімічних чинників. На основі цього було запропоновано переробки золи виносу з вибраних пластів як доцільний та ефективний спосіб виробки вугілля з ціллю попутної виробки рідкоземельних елементів та рідкісних металів.

Перелік посилань

1. Tse, Pui-Kwan, (2011). *China's rare-earth industry: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1042*. <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1042/>
2. Chen, W.-Q., Eckelman, M. J., Sprecher, B., Chen, W., & Wang, P. (2024). Interdependence in rare earth element supply between China and the United States helps stabilize global supply chains. *One Earth*, 7(2), 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.01.011>
3. United States Geological Survey. (2019). Mineral Commodity Summaries 2019. U.S. Geological Survey.
4. Indian Minerals Yearbook 2019 (Part- III : Mineral reviews) 58th Edition Rare earths (advance release) Government of India ministry of mines indian bureau of mines Indira Bhavan, Civil Lines, NAGPUR – 440 001
5. Грінченко, О.В., Курило, М. В., & Михайлов, В.А. (2006). *Металічні корисні копалини України: Підручник*. Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”.
6. Донецький вугільний басейн (Донбас) (2004). *Гірничий енциклопедичний словник : у 3 т, 3, 584–585*.
7. Ishkov, V., Kozii, Y., Chernobuk, O., Pashchenko, P., Kozar, M., & Dreshpak, O. (2024). Spatial distribution of germanium in coal seam c7н of the Pavlohradskia mine field. Collection of Research Papers of the National Mining University, 158–172. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/76.158>
8. Hower, J. C., Fu, B., & Dai, S. (2020). Geochemical partitioning from pulverized coal to fly ash and bottom ash. *Fuel*, 279, 118542. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118542>
9. Maity, S., Choudhary, A. K. S., Kumar, S., & Gupta, P. K. (2022). Partitioning of Rare Earth Elements (REEs) from Coal to Coal Fly Ash in Different Thermal Power Stations (TPSs) of India. *Journal of the Geological Society of India*, 98(4), 460–466. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2002-5>
10. Li, Z., Li, X., Zhang, L., Li, S., Chen, J., Feng, X., Zhao, D., Wang, Q., Gao, Z., & Xiong, B. (2020). Partitioning of rare earth elements and yttrium (REY) in five coal-fired power plants in Guizhou, Southwest China. *Journal of Rare Earths*, 38(11), 1257–1264. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.12.013>
11. Bartoňová, L., Serenčíšová, J., & Čech, B. (2018). Yttrium partitioning and associations in coal-combustion ashes prior to and after their leaching in HCl. *Fuel Processing Technology*, 173, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.01.011>
12. Hood, M. M., Taggart, R. K., Smith, R. C., Hsu-Kim, H., Henke, K. R., Graham, U., Groppo, J. G., Unrine, J. M., & Hower, J. C. (2017). Rare Earth Element Distribution in Fly Ash Derived from the Fire Clay Coal, Kentucky. *Coal Combustion and Gasification Products*, 9(1), 22–33. <https://doi.org/10.4177/ccgp-d-17-00002.1>
13. Hower, J. C., Dai, S., Seredin, V. V., Zhao, L., Kostova, I. J., Silva, L. F., ... & Gurdal, G. (2013). A note on the occurrence of yttrium and rare earth elements in coal combustion products. *Coal Combustion and Gasification Products*, 5(2), 39–47.

14. Wu, G. Q., Wang, T., Zhang, Y. S., Wang, J. W., & Pan, W. P. (2020). Study on the enrichment of rare earth elements between coals and their by-products at coal-fired power plants. *Proc CSEE*, 40(6), 1963–1971.
15. *Мінеральні ресурси України*. (n.d.). <http://minerals-ua.info/mapviewer/metali.php>
16. Ішков, В. В., & Козій, Є. С. (2022). Кореляційно-регресійний аналіз вмісту германію з потужністю та зольністю вугільного пласта с₈^В шахти «Дніпровська». *Від мінералогії і геології до геохімії, петрології, геології та геофізики: фундаментальні і прикладні тренди XXI століття (MinGeoIntegration XXI): збірник праць Всеукраїнської конференції, 28-30 вересня 2022 року*. 129–134. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/161812>
17. Козій, Є., Ішков, В., & Чернобук, О. (2023). Особливості зв'язку між вмістом кобальту і германію у вугільному пласті с₈^В шахти «Дніпровська» Західного Донбасу. *Гірнична геологія та геоecологія*, 1(4), 16–23. [https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2022.1\(4\).273779](https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2022.1(4).273779)
18. Ішков, В. ., Козій, Є., & Чернобук, О. (2022). Аналіз взаємозв'язку концентрацій ванадію і германію у вугільному пласті с₁₀^В шахти «Дніпровська» Західного Донбасу. *Гірнична геологія та геоecологія*, 2(5), 19–26. [https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2022.2\(5\).276073](https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2022.2(5).276073)

ABSTRACT

Purpose. To determine the status and prospects of associated rare earth elements extraction in coal deposits of Western Donbas

Methods. The study was based on a comprehensive analysis of geological and economic data on Western Donbas, literature sources, and statistics on the distribution of rare and rare metals earth elements (REEs) in coal seams. Particular attention is paid to the petrographic composition of coal, depths of occurrence, germanium content in ash and technogenic waste.

Findings. The article analyzes the mining and geological conditions of rare earth elements occurrence in the coal seams of the Western Donbas. It is established that the associated extraction of REE from coal raw materials is technologically possible and expedient. The potential of the REE resource base of the world and Ukraine is estimated. Schemes of REE distribution in coal seams of different thicknesses and roof rocks have been developed, and priority zones for the extraction of mineral raw materials have been identified. The geochemical patterns of germanium distribution in coal seams of the Dnipravska mine (Western Donbas) were analyzed separately. The results of three independent studies analyzing the correlations between Ge content and ash content, seam thickness, and content of associated elements are summarized, which allowed us to propose separate mining of coal and mineral raw materials with an increased REE concentration.

Originality. The regularities of distribution of rare earth elements along the thickness of the coal seam and its roof, in particular germanium – Ge, which is concentrated in the roof and at the contact of the coal seam, have been established. A zone of increased REE concentration in the range of 0.15–0.2 m was identified. The direction of substantiation of rational systems for the preparation and development of coal seams, taking into account the associated production of REE, has been established.

Practical significance. It is proposed to use the associated REE production in the planning of mining operations. It is recommended to use the study to extend the operation of mines during the post-mining period or the life of mines approaching closure.

Keywords: rare earth elements, germanium, Western Donbas, associated mining, coal deposits, strategic raw materials, mineral raw materials germanium, geochemistry, coal, cobalt, vanadium, ash content, correlation.