

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ГЕОХІМІЇ ТА ПРИРОДНОЇ РАДІОАКТИВНОСТІ РУД АЗОВСЬКОГО РОДОВИЩА

Є.М. Шеремет

<https://orcid.org/0000-0002-6097-0477>

І.Ю. Ніколаєв

E-mail: oemidonetsk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2208-0032>

Л.Д. Сетая

E-mail: lasetaya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2996-0289>

С.М. Стрекозов

E-mail: ssss21161@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1421-4910>

*Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України
03142, просп. акад. Палладіна, 34, Київ, Україна*

Здійснено аналіз Азовського родовища цирконій-рідкісноземельних руд як об'єкта, здатного за якісними і кількісними параметрами стати ключовим для створення і модернізації рідкісноземельної підгалузі промисловості України. На основі узагальненої характеристики цирконій-рідкісноземельного зруденіння зроблено висновки щодо природи підвищеної радіоактивності на Азовському родовищі, обумовленої здебільшого наявністю у рудах певних мінералів. Власно радіоактивні мінерали виявлені лише як включення у цирконі і не дають суттєвого внеску у природну радіоактивність руд. Установлено, що радіоактивність є уран-торієвою за рахунок входження цих елементів до складу вказаних мінералів. Наведено результати радіаційно-гігієнічного оцінювання кернових проб родовища. Згідно з чинними нормами, вмісні породи надрудної і підрудної товщ можна використовувати у всіх видах будівництва без обмежень. За рівнем ефективної питомої активності руди родовища віднесені до третього класу. Встановлено, що між гамма-активністю і вмістом суми *REE* родовища існує значний прямий зв'язок. Також існує кореляційна залежність між вмістом U і Th, потужністю дози γ -випромінювання і вмістом суми *REE*. Виявлено відсутність зв'язку між цими показниками і вмістом ZrO_2 . Аналіз кривих гамма-каротажу показав можливість впевненого розмежування рудних і фіксації міжрудних інтервалів. Визначені основні етапи технологічного процесу комплексної розробки, збагачення, переробки і збереження хвостів збагачення, шлаків і шламів, які забезпечують мінімальний вплив виробництва на навколишнє середовище і здоров'я людини.

Ключові слова: рідкісноземельне зруденіння, радіоактивність, гамма-каротаж, безпечна розробка родовища.

Вступ. Геолого-економічна оцінка Азовського цирконій-рідкісноземельного родовища за результатами пошуково-оціночних робіт була виконана УкрДГРІ (м. Київ) в 2006 р. На основі розроблених (2006) і затверджених параметрів тимчасових кондицій Приазовською комплексною геологічною партією (КГП) були підраховані запаси категорій C_1 і C_2 , оцінені перспективні ресурси категорій P_1 і P_2 (Азовське родовище), а також прогнозні ресурси категорії P_3 (Азовська структура.) Отримані показники стали підставою

для висновків щодо промислової значущості Азовського родовища і доцільності його подальшої розвідки з метою уточнення геологічних, гідрогеологічних та технологічних характеристик і економічної оцінки товарної продукції найвищого порядку — оксидів, хлоридів, карбонатів або чистих металів рідкісноземельних елементів (*REE*).

Азовське родовище цирконій-рідкісноземельних руд є об'єктом мінеральної сировини, здатним за якісними і кількісними параметрами стати ключовим для створення

і модернізації рідкісноземельної підгалузі промисловості України. Родовище розташоване в 1,5 км від смт Нікольське (колишнє Володарське) Донецької області.

Нами, спільно з виробничими геологічними підприємствами та науковими установами, виконано великий комплекс аналітичних досліджень з мінералогії, петрографії, геохімії і геофізики вмісних порід і руд цього родовища. Вся інформація (цифрова, текстова, графічна) узагальнена у спеціально розробленій базі даних — БД «Азовське родовище». Методика аналітичних, геофізичних, геохімічних та інших досліджень відповідає чинним на той час стандартам, ухваленим Державною геологічною службою України. Результати були детально розглянуті, проаналізовані та узагальнені у роботах [5—7]. З огляду на підвищений інтерес до Азовського родовища нині та дефіцит об'єктивної інформації, нами передбачено підготувати ряд публікацій, які стосуються тих чи інших аспектів і проблем його можливого відпрацювання. У першій статті зупинимось на стислій характеристиці родовища, особливостях його руд і основних промислових мінералів, які найбільше впливають на рівень радіоактивності руд.

Варто відзначити високий ступінь вивченості родовища в цілому, але, на нашу думку, зараз Азовське родовище і його руди вивчені в обсязі, недостатньому для промислового освоєння об'єкта. Це стосується, головним чином, адаптації технологічної схеми до промислової розробки, зокрема визначення кінцевих товарних продуктів і місць їх отримання, а також вирішення питання підвищеної радіоактивності руд і *REE*-концентратів, характерного для всіх рідкісноземельних родовищ світу.

Таким чином, на цьому етапі вивчення Азовського родовища головними стають питання підготовки його до можливого відпрацювання, серед яких однією з найголовніших проблем є радіоекологічна. Слід підкреслити, що приведення рівня радіоактивності до чинних стандартів, насамперед екологічних, є проблемою інженерно-технологічною, вже вирішеною у розвинених країнах. У рамках майбутнього проекту залишається тільки обрати найбільш економічний та екологічний спосіб вирішення проблеми, для чого необхідно виконати певний комплекс досліджень.

Метою дослідження є визначення особливостей руд Азовського родовища, характеристика їх основних промислових мінералів і оцінення зв'язку природної радіоактивності руд із мінеральним складом і вмістом ΣTR_2O_3 і ZrO_2 .

Результати досліджень та їх обговорення. *Розподіл рідкісних металів у рудах.* За комплексом аналітичних даних у межах Азовської структури виділяють два типи руд: цирконієві та цирконій-рідкісноземельні. Порівняно низький вміст у цирконієвих рудах ZrO_2 (0,1—0,4, рідко — 0,6—0,8 %) і майже повна відсутність у них ΣTR_2O_3 (до 0,1—0,25 %) роблять їх безперспективними для промислового відпрацювання.

Цирконій-рідкісноземельні руди — це головний тип руд, який можна надійно геометризувати за оптимальної геологорозвідувальної мережі.

Власне Азовське цирконій-рідкісноземельне родовище приурочене до поля розвитку «такситових» порід в екзоконтакті тіла біотитових кварцових сієнітів (у південній і південно-східній частинах контакту), у лежачому боці тіла. Розподіл зруденіння контролюється літологічним і структурним факторами. Дослідження показали, що майже всю сукупність «такситових» порід можна розглядати як продуктивну зону з розвинутим вкрапленим циркон-бритоліт-ортитовим зруденінням. Найперспективніша її частина має видиму потужність 25—70 м на флангах зони і 200—450 м у центральній частині. У плані продуктивна зона має серповидну форму, довжина її за простяганням досягає 1800 м, за падінням — 500—600 м. Кут падіння зони до центру структури 40—60°.

Цирконій-рідкісноземельне зруденіння представлено серією роз'єднаних і різноманітних за розміром і формою рудних скупчень, розташованих без певної закономірності у рудоносних зонах. Вони надійно картуються за геофізичними і геохімічними ознаками (підвищена гамма-активність, пилкоподібні діаграми гамма-каротажу і каротажу магнітної сприйнятливості та підвищена концентрація *Zr*, *REE*, *P*, *Be*, *Sn* і *Nb*). Рудні скупчення у рудоносних зонах групуються в рудні тіла, границі яких проведено умовно і тільки на підставі даних випробувань і тимчасових кондицій для підрахунку запасів.

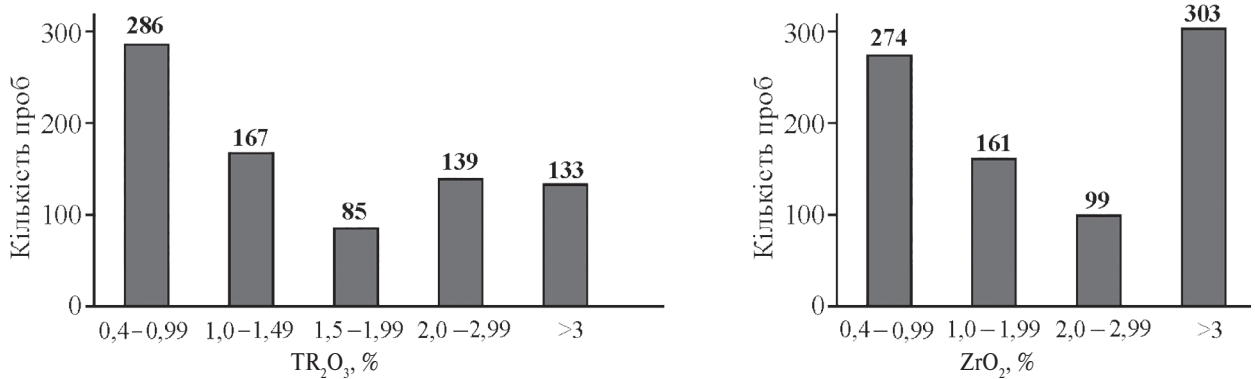


Рис. 1. Розподіл руд за вмістом корисного компонента (за матеріалами Приазовської КГП)

Контакти рудних тіл із вмісними породами нечіткі. Водночас границі власне промислово зручених ділянок надійно відбиваються візуально за керном свердловин за вкрапленнями циркону і бритоліту, різко підвищеним вмістом *REE* і *Zr* та чітко вираженими аномаліями гамма-активності. Вміст рудних мінералів на таких ділянках підвищується до 5–10 %, розмір зерен перевищує 3–5 мм, мінерали легко діагностуються за кольором і чітко відрізняються від інших породоутворювальних мінералів. Усе це обумовлює чіткість границь таких скупчень, де ΣTR_2O_3 перевищує 0,4–0,5 % (поза ними — 0,1–0,25 %).

Основні рудні (промислово вагомні) мінерали: циркон, бритоліт, псевдоморфози по бритоліту, ортит; рудні акцесорні або такі, що утворились унаслідок перетворення бритоліту у псевдоморфози: чевкініт, баделейт, апатит, ксенотим, рабдофаніт, монацит, бастнезит, синхизит, паризит, ураноторит.

У рудних тілах серед природних різновидів руд є ділянки, де макроскопічно добре помітні рудні мінерали — від невеликих скупчень (рядові руди) до ряснішого вкраплення (багаті руди), в яких вміст рудних мінералів дорівнює чи перевищує вміст породоутворювальних. Майже в усіх рудних підсеченнях є ділянки з переважанням рудних мінералів, іноді вони є практично єдиними породоутворювальними мінералами (дуже багаті руди). Ділянки з поодинокими (іноді у вигляді розсіяної вкрапленості) зернами рудних мінералів віднесені до бідних. Промислово цінні ділянки з видимою рудною мінералізацією розрізнені і представлені сполученнями мінеральних комплексів: циркон-бритоліт-ортит; циркон-ортит-бритоліт; бритоліт-ортит-цир-

кон; бритоліт-циркон-ортит; істотно цирконові; істотно рідкісноземельні з переважанням бритоліту. Морфологія рудних скупчень: прожилковидні, плямисті, тонко- і груборозсіяна вкрапленість, гніздова вкрапленість, поєднання скупчень і вкрапленості, пойкилобластова вкрапленість у фемічних мінералах.

У рудних тілах визначені ділянки «порожніх» порід, що містять ΣTR_2O_3 до 0,45 %. В корисній товщі розмежовуються ділянки «убогих» (надто бідних) (ΣTR_2O_3 від 0,40 до 0,99 %), «бідних» (1,00–1,49), «рядових» (1,50–1,99), «багатих» (2,00–2,99), «надбагатих» руд (3,0–10,0) та руд з ураганим вмістом ΣTR_2O_3 — понад 10 %.

Закономірностей у розміщенні збагачених рудою ділянок і некондиційних прошарків у контурах рудних тіл не встановлено. В зв'язку з цим геометризувати такі ділянки як відокремлені тіла і селективно відпрацьовувати їх практично неможливо, що підтверджується результатами буріння зближених технологічних свердловин.

На родовищі переважають убогі *REE*-руди (рис. 1), але в сумі з багатими вони домінують над непромисловими типами. Гістограми наочно демонструють нерівномірність розподілу вмісту руди у межах родовища.

Вміст основних рудних компонентів варіює у широких межах: ΣTR_2O_3 — від 0,4 до 9,9 % (останній — у св. № 74г), ZrO_2 — від 0,4 до 9,97 % (останній — у св. № 23).

У більшості перетинів вміст ZrO_2 вищий, ніж ΣTR_2O_3 (70 % від загальної кількості), в середньому по родовищу — в 1,58 раза. Коефіцієнт варіації корисних компонентів: ΣTR_2O_3 — 85 %, ZrO_2 — 85 %; коефіцієнт кореляції значень вмісту ΣTR_2O_3 і ZrO_2 — 0,185.

Відзначено, що проби з високим вмістом корисних компонентів чергуються з пробами убогих і бідних руд, а інтервал «зрушення» дуже різний за потужністю. Коефіцієнт варіації ділянок руд за ступенем зруденіння, %: для убогих руд — 88, бідних — 81, рядових — 88, багатих — 90, надто багатих — 79.

Як зазначено вище, руди Азовського родовища мають відносно простий мінеральний склад. Рудні мінерали представлені силікатами (циркон, ортит), рідкісноземельними фосфатами (бритоліт, монацит, апатит), фторкарбонатами (бастнезит, паризит), оксидами (магнетит) і фторидами (флюорит, іттрофлюорит), нерудні — польовим шпатом, амфіболом, піроксеном, кварцом, біотитом, кальцитом та ін. Практичне значення мають рудні мінерали — бритоліт, циркон, ортит і псевдоморфози по бритоліту (чевкініт, баделейт, апатит, ксенотим, іттрофлюорит, ітріаліт, рабдофаніт, монацит, бастнезит, сінхізит, паризит, ураноторит).

Промислово цінні мінерали містять від 0,1 до 5,2 % ThO_2 (найбільший вміст — у мало поширеному монациті). У головних рудних мінералах — бритоліті та ортиті — вміст ThO_2 дещо менший: 0,3—1,1 і 0,1—0,4 % відповідно, вміст урану (UO_2) в нечисленних аналізах становить 0,1—0,3 %. Таким чином, у рідкісноземельних мінералах Азовського родовища вміст торію переважає вміст урану, отже можна констатувати переважно торієву природу радіоактивності, що в принципі характерно для рідкісноземельних мінералів з переважанням лантанодів церієвої групи з більшістю подібних родовищ світу. У цирконі рідкісноземельних родовищ світу вміст урану, як правило, не перевищує 0,5 %, торію — менше за 0,1 %. Вміст ітрію звичайно дорівнює 0,001—0,500 %, а $\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3$ — 0,1—0,25 %.

У цирконі з рудних сієнітів Ястребецького родовища (прямий аналог Азовського) вміст торію та урану — 0,094—0,19 % [2], до того ж, вміст урану і торію в цирконі Азовського родовища вкрай варіабельний. В одному зерні циркону міститься торію і урану від 0,0008 до 0,0097 %, в іншому — торію до 0,14 %, а урану до 0,3 %, що, очевидно, пов'язано з зональністю та метаміктністю мінералу. Також із цього джерела [2]: відношення Th/U — 0,3—0,8.

Торит (ураноторит) виявлений у вигляді включень у цирконі і діагностований тільки

на підставі мікрозондового аналізу. Також торит описаний О.В. Левашовою в поодиноких зразках циркону у вигляді дрібних округлих вкраплень, які за розміром не перевищують 3—5 мкм. Вони виявлені виключно у рудних інтервалах. За результатами одиничних аналізів торит містить 55 % ThO_2 і 17 % UO_2 . Інших власне радіоактивних мінералів, за винятком ураноториту, не виявлено, хоча це можливо за умови ретельнішого вивчення.

Наявний ступінь вивченості дає підстави підтвердити можливість виявлення цих мінералів тільки в акцесорній кількості, що не може істотно вплинути на ступінь радіоактивності порід, руд і промислових концентратів. У рудах переважають легкі лантанодиди церієвої підгрупи, які складають 70—90 % від ΣREE . Вміст Y змінюється від 3—4 до 8—9 % із середнім значенням 6,2 % і не залежить від вмісту ΣREE , тобто у пробах з різним вмістом ΣREE співвідношення елементів церієвої та ітрієвої груп практично не змінюється.

Склад REE в одному з рідкісноземельних концентратів масою 10 кг, переданому для гідрометалургійних досліджень, такий, %: Ce — 48,62; La — 18,7; Nd — 17,1; Pr — 4,2; Sm — 3,0; Dy — 1,6; Ho — 0,3; Tm — 0,08; Tb — 0,3; Yb — 0,3; Er — 0,4; Y — 5,4. Співвідношення лантанодидів легкої і середньо-важкої груп (включаючи Y) — 7,8 : 1.

Розрахований за результатами вивчення технологічних проб, рідкісноземельних концентратів і кінцевих продуктів гідрометалургійної переробки коефіцієнт М.О. Солодова для руд Азовського родовища, який враховує також вартість ітрію і середньо-важких лантанодидів у кінцевій продукції, становить 6—7, іноді 8, на підставі чого руди можна класифікувати як ітрієво-церієвоземельні ($\text{TR}_{\text{Ce}}/\text{TR}_{\text{Y}} = 5—20$) [3, 4].

За деякими даними, в мішметалі, отриманому з руд родовища, тільки оксид ітрію складає 2,0—2,5 % від вмісту $\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3$, що наближає руди за вартісним внеском у кінцевий товарний продукт до ітрієвоземельних. Це, очевидно, пов'язано з тим, що у псевдоморфозах по бритоліту ксенотим, іттрофлюорит та ітріаліт поширеніші, ніж установлено на даному етапі вивченості мінералогії. Саме вміст останніх збільшує товарну ціну руд і в цілому промислово цінність родовища. Чіткої залежності між вмістом REE і Y в рудах

не спостерігається, хоча на ділянках з дуже високим вмістом *REE* частка *Y* помітно нижча за середню. Частка самарієвих і ербієвих лантанодів — від 4,5 до 11 % від суми *REE* і Y_2O_3 ; переважають значення 6—7 %.

Радіаційно-гігієнічна оцінка порід і руд родовища. Роботи було виконано лабораторією радіаційно-екологічних досліджень ВАТ «УкрНТЕК» (2004) на підставі Акредитації Донецького державного центру стандартизації, метрології та сертифікації. Для визначення вмісту радіонуклідів у пробах використаний гамма-спектрометр (сцинтиляційний детектор, аналізатор імпульсів АІ-1024, комп'ютерна обробка за допомогою програми Казимилова «АК»). Для отримання достовірного результату кожену пробу вимірювали тричі й обчислювали середнє значення.

Можливість використання досліджених матеріалів як будівельних визначалась за величиною сумарної ефективної питомої активності ($A_{\text{эф}}$) будматеріалу або мінеральної сировини:

$$A_{\text{эф}} = A_{\text{Ra}} + 1,31A_{\text{Th}} + 0,085A_{\text{K}}. \quad (1)$$

Це штучний інтегральний параметр, де A_{Ra} , A_{Th} , A_{K} — питома активність радію (^{226}Ra), торію (^{232}Th), які перебувають у рівновазі з іншими членами уранового і торієвого рядів, і калію (^{40}K) відповідно, *n*, Бк/кг.

Результати радіаційно-гігієнічної оцінки керну (дані Приазовської КПП) показали, що руди мають підвищену природну радіоактивність. Величина сумарної ефективної питомої активності коливається від 578 до 9095 Бк/кг. Вміст суми *REE* у цих пробах — 0,5—10,8 %, середній — 2,82; вміст ZrO_2 — 0,17—14,2, середній — 3,99 %.

Мінімальні і максимальні значення $A_{\text{эф}}$ приурочені до такситового амфіболового рудного сієніту у св. 81г. Рудний інтервал з вмістом суми *REE* 0,5 % відповідає мінімальному значенню $A_{\text{эф}}$; сума *REE* 10,8 % відповідає максимальному значенню $A_{\text{эф}}$. Спостерігається сильний прямий зв'язок значень $A_{\text{эф}}$ і вмісту суми *REE* — коефіцієнт кореляції досягає 0,98.

Водночас у рудному інтервалі з мінімальним значенням $A_{\text{эф}}$ зафіксовано вміст ZrO_2 2,9 %, а в рудному інтервалі з максимальним значенням $A_{\text{эф}}$ — 2,75 %. Середні значення вмісту ZrO_2 характерні для рудних інтервалів як з низьким, так і з високим значенням $A_{\text{эф}}$.

Це свідчить про відсутність зв'язку між величиною $A_{\text{эф}}$ і вмістом ZrO_2 в досліджених рудних інтервалах, що підтверджує вкрай низьке значення коефіцієнту кореляції (0,013).

Крім кернових проб були досліджені три композитні технологічні проби, які характеризують різні рівні рудного тіла — ділянки першочергового відпрацювання, а в них — зразки з різним вмістом корисних компонентів, від практично безрудних до ураганих.

У зразках проб верхнього горизонту ефективна питома активність змінюється від 100 до 1350 Бк/кг, середнє значення — 600. Для руд середнього горизонту — 60—1400 Бк/кг, середнє — 700. Для руд нижнього горизонту — 100—2200 Бк/кг, середнє — 800.

Зростання $A_{\text{эф}}$ безсумнівно пов'язано зі збільшенням вмісту суми *REE* від верхнього горизонту до нижнього (відповідно 1,32—1,40—1,76 %) за загальним витриманого вмісту ZrO_2 , який дещо перевищує 3 %.

Згідно з класифікацією НРБУ-97, будівельні матеріали та мінеральна сировина за величиною $A_{\text{эф}}$ природних радіонуклідів (усереднені значення $A_{\text{эф}}$ у межах покладів корисних копалин, ділянки, відвалу або партії матеріалу) поділяються на класи:

- 1 — для усіх видів будівництва без обмежень (до 370 Бк/кг);
- 2 — для промислового будівництва та будівництва шляхів (370—740 Бк/кг);
- 3 — у населених пунктах для будівництва підземних споруд, покритих шаром ґрунту товщиною понад 0,5 м, без тривалого перебування людей; за межами населених пунктів — для будівництва шляхів, гребель з малим часом перебування людей (740—1 350 Бк/кг).

Руди Азовського родовища в цілому відповідають третьому класу.

Значення сумарної $A_{\text{эф}}$ вмісних порід (надрудна, підрудна товщі) — 40—337 Бк/кг за середнього значення 191 Бк/кг. Ці породи належать до першого (рідше другого) класу будівельних матеріалів, саме з них отримують товарні польовошпатові концентрати, придатні для використання в керамічній промисловості України та для виробництва щебеню.

Зв'язок між потужністю дози γ -випромінювання руд, вмістом рідкісноземельних елементів, урану і торію. Були зіставлені результати гамма-каротажу (ГК) з результатами випробування керну на вміст суми *REE*, ZrO_2 , *U* і

Th. Розподіл суми *REE* рудоносних зон добре корелює з результатами ГК. Максимальним значенням суми *REE* у керні відповідає максимальна потужність експозиційної дози γ -випромінювання, яка в розглянутих свердловинах досягає 670 мкР/год, і, навпаки, мінімальному вмісту *REE* відповідають знижені значення потужності дози (табл. 1).

Коефіцієнт кореляції результатів ГК із вмістом суми *REE* у рудних інтервалах дорівнює 0,929 (табл. 2), зв'язок прямий і описується рівнянням лінійної регресії з константою 18,01 та коефіцієнтом 67,26 (рис. 2).

Зв'язок суми *REE* з γ -випромінюванням руд (за результатами гамма-каротажу) описується рівнянням лінійної регресії з константою -0,002 та коефіцієнтом 0,013. У межах убогих, бідних, рядових і багатих руд відсутній зв'язок дози γ -випромінювання і вмісту суми *REE* (коефіцієнти кореляції 0,575, 0,211, 0,362 та 0,294 відповідно).

Не спостерігається кореляційної залежності між результатами ГК і вмістом ZrO_2 (коефіцієнт кореляції 0,164). Високі значення вмісту ZrO_2 відповідають як високим, так і низьким значенням дози γ -випромінювання.

Так, для проб з вмістом ZrO_2 на рівні 9—9,5 % характерними є значення експозиційної дози γ -випромінювання від 39 до 547 мкР/ч.

Те саме спостерігається і для низького вмісту ZrO_2 — за 0,4 % розкид значень експозиційної дози γ -випромінювання становить від 16 до 448 мкР/год.

Такий характер має і кореляція ZrO_2/U з ZrO_2/Th . За збільшення вмісту ZrO_2 концентрація U і Th не зростає і не зменшується. Значення коефіцієнта кореляції (див. табл. 2) підтверджують відсутність зв'язку. Підвищені значення γ -випромінювання в пробах із низьким вмістом ZrO_2 можна пояснити вкрапленістю ториту.

За результатами рентгеноспектрального аналізу (Приазовська КГП, проаналізовано 325 проб) виявлено, що в рудних породах вміст Th коливається від 0,0008 до 0,0978 %, а U — від 0,00015 до 0,0097 % за середніх значень 0,0204 і 0,0023 % відповідно. Розподіл цих елементів досить нерівномірний, коефіцієнт варіації у рудних інтервалах для U дорівнює 70 %, для Th — 79 %. У середині рудних категорій коефіцієнт варіації близький до 33 %, що може свідчити про однорідність вибірок. Співвідношення U/Th в рудах — 1: 9, до того ж між ними існує кореляційна залежність (0,975).

Варто зазначити, що тільки для пари U/Th характерним є значущий коефіцієнт кореляції у кожній категорії руд (для убогих — 0,827, бідних — 0,744, рядових 0,889, багатих — 0,947, дуже багатих — 0,964).

Таблиця 1. Описова статистика рудних інтервалів

Параметр	Значення			Стандартне відхилення, %	Коефіцієнт варіації, %
	min	max	Середнє		
Вміст TR_2O_3 , %	0,40	9,90	1,68	1,43	85
Вміст ZrO_2 , %	0,40	9,97	2,75	2,34	85
Потужність експозиційної дози γ -випромінювання (ГК), мкР/год.	8,00	670,00	131,04	103,83	79
Вміст U, %	0,00015	0,0097	0,002258	0,00159	70
Вміст Th, %	0,0008	0,0978	0,02032	0,016086	79

Таблиця 2. Матриця парних коефіцієнтів кореляції для рудних інтервалів

Параметр	ГК	TR_2O_3	ZrO_2	U	Th
Потужність експозиційної дози γ -випромінювання (ГК)	—	0,929	0,164	0,929	0,915
TR_2O_3	—	—	0,185	0,898	0,885
ZrO_2	—	—	—	0,095	0,008
U	—	—	—	—	0,975

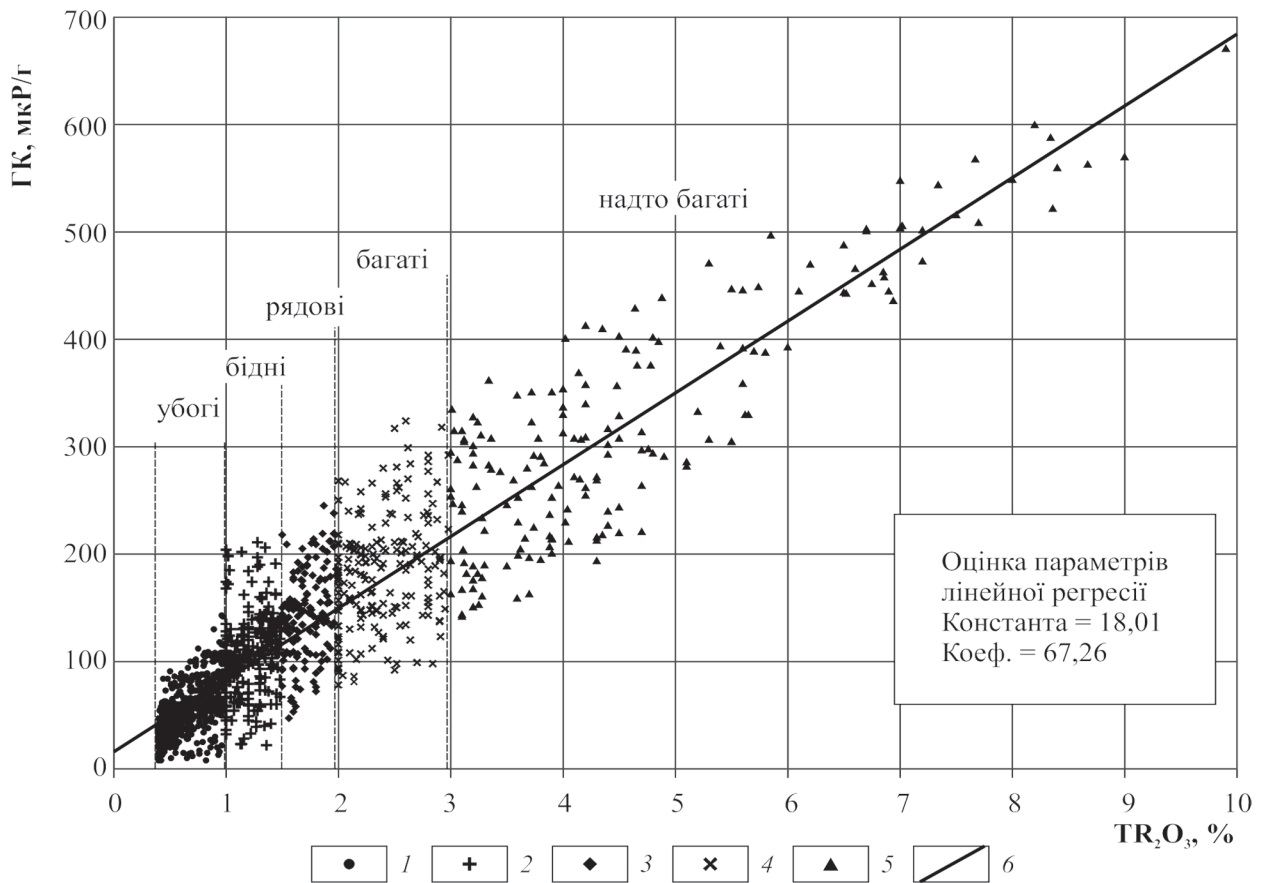


Рис. 2. Оцінка зв'язку експозиційної дози γ -випромінювання і ΣREE у рідкісноземельних рудах Азовського родовища (за даними Приазовської КГП): 1–5 – категорія руд (1 – убогі, 2 – бідні, 3 – рядові, 4 – багаті, 5 – надто багаті); 6 – лінія регресії

Помітна кореляційна залежність між вмістом урану і торію і потужністю дози γ -випромінювання (коефіцієнт кореляції 0,929 і 0,915) і вмістом суми REE (коефіцієнт кореляції 0,898 і 0,885), зв'язок прямий, лінійний. Значущі оцінки характерні так само тільки для дуже багатих руд і всього рудного інтервалу в цілому.

Установлено такий вміст Th_2O_3 в кінцевих продуктах збагачення конкретних проб, %: рідкісноземельний продукт – 0,09 (ΣREE 9,2), 0,08 (ΣREE 8,0), 0,1 (ΣREE 13,45); цирконовий концентрат (62–63 %) відповідно 0,02; 0,04; 0,07; польовошпатовий концентрат – 0,02; 0,02; 0,03; 0,02.

Оконтурювання рудних тіл за даними гамма-каротажу. Гамма-каротаж свердловин виконано за стандартною методикою [1] з метою літологічного розчленування розрізів свердловин, оцінення потужності дози гамма-випромінювання порід, випробування аномальних зон на вміст основних радіонуклідів, а також для виділення рудних зон.

Якісне розчленування розрізу за результатами гамма-каротажу досить чітке. Рудні зони за рахунок урану і торію, які ізоморфно входять до складу рудних мінералів (ортиту, бритоїту та ін.), характеризуються підвищеним рівнем γ -випромінювання (50–500 мкР/год). У вмісних породах і безрудних прошарках фонові значення експозиційної дози γ -випромінювання – 10–17 мкР/год.

Зіставлення діаграм гамма-каротажу з розподілом суми REE у вертикальному розрізі рудоносних зон (результати випробування керну) показало їхню добру кореляцію (рис. 3).

Велика диференціація графіків ГК із рудоносних зон свідчить про складність їхньої будови, обумовлену чергуванням олівін-амфіболових лужно-польовошпатових сієнітів, збагачених цирконієвими і рідкісноземельними мінералами, що складають багаті цирконій-рідкісноземельні руди, і кварцвмісних безрудних сієнітів. Найкраща відповідність діаграм ГК будові зон спостері-

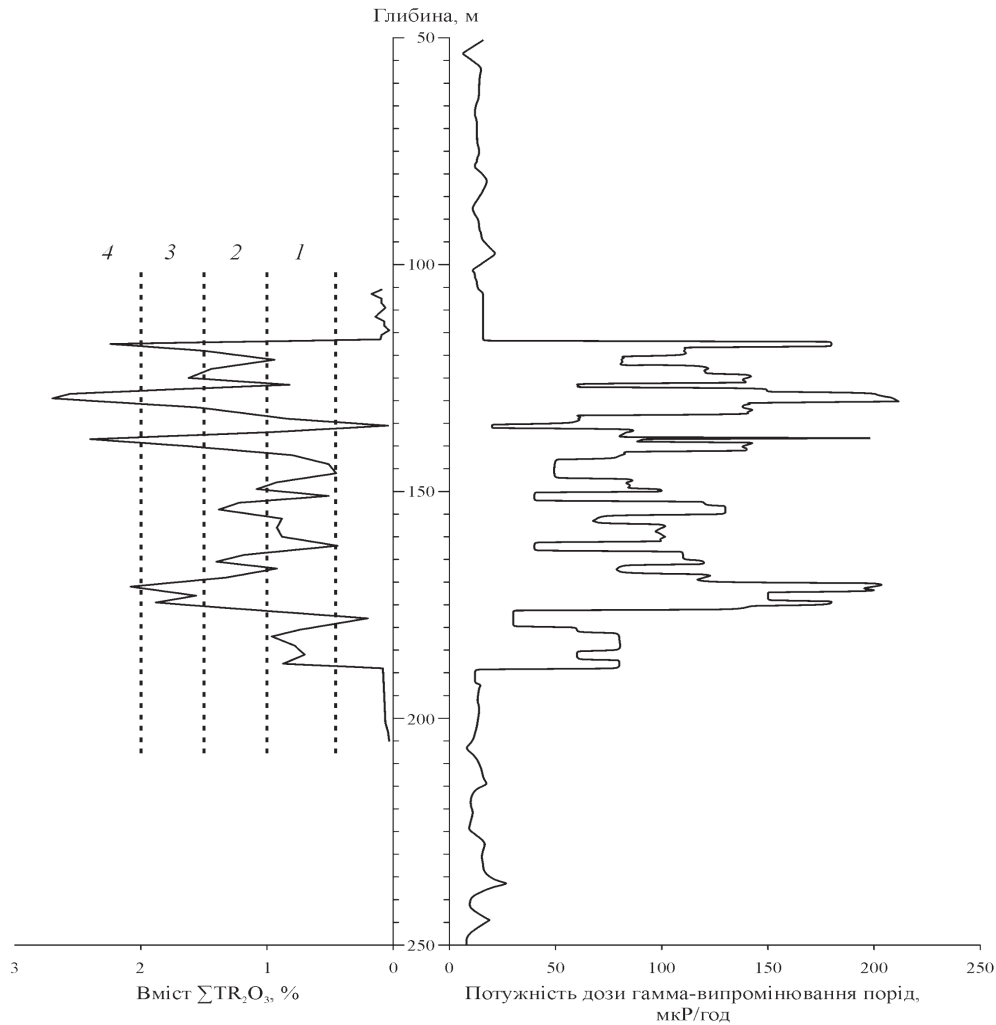


Рис. 3. Зіставлення діаграми ГК і результатів випробування керну на ΣTR_2O_3 (дані Приазовської КГПБ, свердловина 43): категорія руд: 1 – убогі, 2 – бідні, 3 – рядові, 4 – багаті

гається за потужності безрудних інтервалів понад 1 м. За меншої потужності поєднується гамма-випромінювання від зближених рудних інтервалів.

Зважаючи на це, за принципом суперпозиції, а також за симетричністю гамма-аномалій від рудних інтервалів, складні за формою криві ГК були розчленовані на прості гамма-аномалії таким чином, що вони мають вигляд чергування інтервалів підвищених і знижених або фонових значень γ -випромінювання. Завдяки цьому прийому всередині рудоносних зон виділено безрудні інтервали, яких до цього не було видно через накладання γ -випромінювання від сусідніх рудних інтервалів. Потужність безрудних інтервалів становить від 5–10 до 20–40 см. Порівняння з результатами випробування показало, що їх зазвичай включають у руд-

ну пробу. Тому значення γ -випромінювання у виділених аномаліях всередині рудоносних зон (за даними Приазовської КГП) не завжди відповідають сумі REE.

Деякі передумови геолого-екологічної оцінки безпеки відпрацювання Азовського родовища рідкісноземельної сировини. Можлива експлуатація Азовського рідкіснометалевого родовища в тій чи іншій мірі позначиться на природному середовищі, вплине на надра, підземні і поверхневі води, атмосферу, ґрунти і рослинність, ландшафт. Цей вплив має бути відображений у результатах спеціальних досліджень (Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017), які на цій стадії не виконували. Досвід вивчення подібних родовищ показав, що рідкісноземельні руди мають підвищену природну радіоактивність, пов'язану з вмістом радіонуклідів

унаслідок їх геохімічної подібності з рідкісноземельними елементами. У більшості випадків у таких рудах трапляються торій-232, уран-238, калій-40, радій-226, свинець-212. Вони концентруються переважно в головних рідкісноземельних і рідкіснометалевих мінералах Азовського родовища, іноді утворюють власні мінерали. Істотний внесок у питому активність рідкісноземельних руд і пов'язаних з ними відходів вносять переважно торій-232 і уран-238 (92–95 %), решта активності пов'язана з калієм-40 та іншими елементами.

У попередні роки на площі родовища були виконані еколого-геологічні дослідження, характерні для геологорозвідувальних робіт — радіометрична і металометрична зйомка з відбором проб із ґрунтів та водотоків.

Через досить потужний чохол (переважно 15–21 м) суглинків, які перекривають рудні породи, вони не визначаються на земній поверхні γ - і β -випромінюванням; у ґрунтах (вторинні геохімічні ореоли) також не виявлено підвищеного вмісту радіоактивних елементів.

Населення використовує воду з власних криниць. Підземні води як у колодязях, так і в свердловинах не відповідають нормативам на питну воду, проте, у зв'язку з відсутністю якісної води, використовуються для господарсько-питного водопостачання з дозволу санстанції. Підвищеного вмісту шкідливих компонентів у водах не встановлено. Тобто дослідження показали відсутність забруднення території родовища радіонуклідами природного і техногенного походження, а також підвищеної концентрації шкідливих хімічних елементів. Ці роботи мали оцінний характер і, безсумнівно, їх треба продовжити у більшому обсязі.

Довгий час займаючись вивченням Азовського і подібних йому родовищ, автори дійшли висновку, що основна «забрудненість» території родовища буде пов'язана з видобутком, транспортуванням, переробкою і збагаченням рідкісноземельних руд.

Тому, як робочий варіант унормування активності і чинних санітарних норм, пропонуємо виконувати:

— відпрацювання родовища закритим способом з попередньою сепарацією «на місці» різними методами — гравітаційним,

у важких середовищах, рентгено-радіометричним тощо;

— отримання чорнового рідкісноземельного концентрату за відповідними стандартами рівня активності;

— транспортування концентрату для подальшої переробки за спеціальним сценарієм та у відповідній тарі;

— переробку концентрату за гідрометалургійною технологією, що діє на уранових підприємствах України з осадженням на першому етапі заліза і радіоактивних компонентів;

— увесь інший процес збагачення — без активних елементів за стандартною технологічною схемою;

— під час розробки і збагачення здійснювати постійний радіаційний контроль продукції, що випускається, шлаків і шламів, вбросних вод тощо.

Слід зазначити, що подібні лабораторні дослідження збагачення та гідрометалургії були виконані фахівцями СхідГЗК за договором з КП «Південукргеологія» на початку 2000-х років. Отримано обнадійливі результати. Надалі потрібно виконати апробацію на великооб'ємній пробі з доопрацюванням певних частин схеми.

Висновки. 1. Природа підвищеної радіоактивності на Азовському рідкіснометалево-рідкісноземельному родовищі визначена насамперед наявністю у рудах певних мінералів, переважно бритоліту, ортиту, псевдоморфоз по бритоліту, циркону і, в останню чергу, — акцесорних мінералів: ксенотиму, монациту, бастнезиту, ітріаліту, ториту та ін. Власне радіоактивні мінерали (торит) виявлені лише як включення у цирконі і суттєво не впливають на природну радіоактивність руд. Радіоактивність є уран-торієвою за рахунок входження цих елементів до складу названих мінералів.

2. За результатами радіаційно-гігієнічного оцінювання кернових проб вмісні породи надрудної і підрудної товщ можуть бути використані у всіх видах будівництва без обмежень; руди родовища належать до третього класу за рівнем ефективної питомої активності.

3. Показано прямий зв'язок між дозою гамма-випромінювання і вмістом *REE*. Також виявлено кореляційну залежність між вмістом U і Th, потужністю дози γ -випро-

мінювання та вмістом суми *REE*, зв'язок прямий, лінійний. Високі значення вмісту U і Th у пробах з низьким вмістом ZrO_2 (залежність відсутня) ймовірно пов'язані з вкрапленнями ториту.

4. Значний прямий лінійний зв'язок між дозою гамма-випромінювання вмістом *REE*, а також аналіз кривих ГК, дають підстави впевненого розмежовувати рудні інтервали за свердловинами, а також виділяти міжрудні інтервали.

5. Відзначено, що у випадку переробки рідкісноземельних руд на гірничо-промислових і гірничо-металургійних підприємствах вплив іонізаційного випромінювання залежить, головним чином, від технологічного процесу розробки, збагачення, перерозподілу й зберігання хвостів збагачення, шлаків і шламів. Запропоновано основні кроки технологічного процесу, який забезпечить мінімальний вплив виробництва на навколишнє середовище і здоров'я людини.

Література

1. Инструкция по гамма-каротажу скважин при массовых поисках урана. Под ред. Дунаева В.В. Мингеологии СССР. Ленинград, 1982. 101 с.
2. Левашова Е.В. Геохимия редких элементов в цирконе из щелочных пород с редкоземельной минерализацией (Украинский щит). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург, 2018. 240 с.
3. Стрекозов С.Н., Васильченко В.В., Гурский Д.С., Пожарицкая Л.К., Волкова Т.П. Геологическое строение и характер оруденения Азовского месторождения. *Мінер. ресурси України*. 1998. № 3. С. 6—9.
4. Усова Т.Ю., Солодов Н.А. Формационно-парагенетические типы месторождений иттрия и иттриевых лантаноидов. Москва, 1989. 48 с.
5. Шеремет Е.М., Стрекозов С.Н., Кривдик С.Г., Волкова Т.П., Исаев В.А., Николаев И.Ю., Николаев Ю.И., Сетая Л.Д., Агаркова Н.Г., Мартынов Г.П. Прогнозирование рудопоявлений редких элементов Украинского щита. Донецк: Вебер, 2007. 220 с.
6. Шеремет Е. М., Стрекозов С.Н., Омельченко А.А. Вопросы экологии при разработке Азовского месторождения редкометалльно-редкоземельных руд повышенной радиоактивности восточного Приазовья (Украинский щит). *Проблеми екології*. 2007. № 1—2. С. 125—129.
7. Шеремет Е.М., Мельников В.С., Стрекозов С.Н., Козар Н.А., Возняк Д.К., Кульчицкая А.А., Кривдик С.Г., Бородиня Б. В., Волкова Т. П., Седова Е. В., Омельченко А. А., Николаев И. Ю., Николаев Ю. И., Сетая Л.Д., Агаркова Н.Г., Гречановская Е.Е., Фощий Н.В., Екатериненко В.Н. Азовское редкометалльное месторождение Приазовского мегаблока Украинского щита (геология, минералогия, геохимия, генезис, проблемы эксплуатации). Донецк: Ноулидж, 2012. 374 с.

Надійшла 25.10.2021.

References

1. Dunaev V.V. (Ed.). (1982). Gamma-ray well logging instruction for in mass prospecting for uranium. Mingeo USSR, Leningrad. 101 p. [in Russian].
2. Levashova E.V. (2018). Geochemistry of rare elements in zircon from alkaline rocks with rare earth mineralization (Ukrainian shield). Thesis of PhD in geol.-min. science. St. Petersburg. 240 p. [in Russian].
3. Strekozov, S.N., Vasilchenko V.V., Gursky D.S., Pozharitskaya L.K., Volkova T.P. (1998). Geological structure and mineralization nature of the Azov deposit. *Mineral resources of Ukraine*. 3. P. 6-9 [in Russian].
4. Usova T.Yu., Solodov N.A. (1989) Formation-paragenetic types of yttrium and yttrium lanthanide deposits. Moscow. 48 p. [in Russian].
5. Sheremet, E.M., Strekozov, S.N., Kryvdik, S.G., Volkova, T.P., Isaev, V.A., Nikolaev I.Yu., Nikolaev Yu.I., Setaya L.D., Agarkova N.G., Martynov G.P. (2007). Ore occurrences forecasting of rare elements of the Ukrainian Shield. Weber press, Donetsk. 220 p. [in Russian].
6. Shereme, E.M., Strekozov S.N., Omelchenko A.A. (2007) Environmental issues during the development of the Azov deposit of rare-metal-rare-earth ores of increased radioactivity in the eastern Azov region (Ukrainian shield). *Ecology problems. Scientific proceedings*. 1-2. P. 125-129 [in Russian].
7. Sheremet E.M., Melnikov V.S., Strekozov S.N., Kozar N.A., Voznyak D.K., Kulchitskaya, A.A., Krivdik S.G., Borodnya B.V., Volkova T.P., Sedova E.V., Omelchenko A.A., Nikolaev I.Yu., Nikolaev Yu.I., Setaya L.D., Agarkova N.G., Grechanovskaya E.E., Foshchii N.V. and Ekaterinenko V.N. (2012). The Azov rare metal deposit of the Priazovsky megablock of Ukrainian shield (geology, mineralogy, geochemistry, genesis, problems of exploitation). Noulidzh, Donetsk. 374 p. [in Russian].

Received 25.10.2021.

E.M. Sheremet

<https://orcid.org/0000-0002-6097-0477>

I.Yu. Nikolaev

E-mail: oemidonetsk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2208-0032>

L.D. Sietaia

E-mail: lasetaya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2996-0289>

S.M. Strekozov

E-mail: ssss21161@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1421-4910>

M.P. Semenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
03142, ave. acad. Palladina 34, Kyiv, Ukraine

SOME ASPECTS OF THE GEOCHEMISTRY AND NATURAL RADIOACTIVITY OF THE AZOV DEPOSIT ORES

The analysis of the Azov deposit of zirconium-rare earth ores as the object capable on qualitative and quantitative parameters to become key for creation and modernization of rare earth subsectors of the industry of Ukraine is carried out.

On the basis of the generalized characteristics of zirconium-rare earth mineralization, conclusions were drawn regarding the nature of the increased radioactivity at the Azov deposit, which is mainly due to the presence of certain minerals in the ores. The actual radioactive minerals were found only as inclusions in zircon and do not make a significant contribution to the natural radioactivity of ores. It has been established that the radioactivity is uranium-thorium due to the inclusion of these elements in the composition of the aforementioned minerals.

The results of the radiation-hygienic assessment of core samples from the deposit are presented. According to the existing standards, the enclosing rocks of the supra-ore and under-ore strata can be used in all types of construction without restrictions. The ores of the deposit are assigned to the third class in terms of the level of effective specific activity.

It was found that there is a significant direct relationship between gamma activity and the total REE content in the field. There is also a correlation between the content of U and Th, the dose rate of γ -radiation and the content of the total REE. It was shown that there is no relationship between these indicators and the ZrO_2 content. Analysis of the gamma-ray logs showed the possibility of confidently drawing the boundaries of the ore intervals and fixing the inter-ore intervals.

The main stages of the technological process of integrated development, enrichment, processing and storage of enrichment tailings, slags and sludge, which ensure the minimum impact of production on the environment and human health, have been determined.

Keywords: rare earth mineralization, radioactivity, gamma logging, ecological safety, field development.