

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.02.049>

УДК 559.9+553.493 (477)

Г.О. Кульчицька, д-р геол. наук, голов. наук. співроб.

E-mail: kulchechanna@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7206-4797>

Д.С. Черниш, канд. геол. наук, зав. відділу

E-mail: chernysh_d@ua.fm; <https://orcid.org/0000-0001-5390-2591>

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

БАЗА ДАНИХ МІНЕРАЛІВ РІДКІСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ УКРАЇНИ

Показано, що поняття "рідкісні елементи" є досить умовним. Перелік рідкісних елементів, так само як критерії їх виділення, постійно змінювались з часом. Геохімічні і мінералогічні критерії поступово тісно переплелися з технологічними й економічними. До таких критеріїв як незначне поширення в земній корі, слабе мінералоутворення, відсутність великих родовищ, долучилися технологічні складнощі вилучення, мінімальне застосування в техніці, нерентабельність видобутку або штучний дефіцит унаслідок монополізації запасів компаніями-поставниками. Перелік видів критично важливої мінеральної сировини, основу якого складають малопоширені хімічні елементи, з року в рік розширюється, до дефіцитних потрапляють майже всі елементи з кларком менше 100 ррт. Це спонукає мінералогів звертати увагу на більше коло мінералів-носіїв малопоширених елементів, ніж це було раніше, розширюючи таким чином перелік рідкісних елементів. Мінерали-носії рідкісних елементів доцільно згрупувати не за геохімічними, а за хімічними властивостями елементів, оскільки близькі властивості є запорукою їх використання в тих самих галузях промисловості. База даних мінералів України налічує близько 900 мінеральних видів, у шести сотнях із них рідкісні елементи є видо- і відміноутворювальними. Запропоновано розділити їх на такі групи: мінерали лужних (Li, Rb, Cs), лужноземельних (Be, Sr, Ra), перехідних (Sc, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W, Re, Cd, Hg), амфотерних (Ga, In, Sn, Tl, Bi), благородних (Pt, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Au, Ag), рідкісноземельних (Y, La, Ce та інші лантаніди) і радіоактивних (Th, U) металів, напівметалів (B, Ge, As, Sb, Te), неметалів і галоїдів (Se, Br, I). Базу даних слід доповнити мінералами таких низьокларкових перехідних елементів як Cu, Co, Cr, Ni, Zn і Pb, передбачуваних елементів майбутнього. Земні надра України містять значний потенціал для розширення бази даних мінералів рідкісних елементів і приросту запасів критично важливої сировини.

Ключові слова: групи рідкісних елементів, критично важлива сировина, мінерал, база даних мінералів України.

Вступ. Інтенсивний розвиток електроніки на рубежі XX—XXI сторіч ознаменувався пошуком родовищ рідкісних елементів (РЕ), щоб задовольнити попит промисловості. Акценти пошуку того чи іншого елемента зміщувались залежно від його дефіциту на ринку, нерідко штучно створеного. Асортимент РЕ постійно розширювався і розширюється надалі. Якщо у другій половині XX ст.

увага була прикута до рідкісних легких металів (Li, Rb, Be), то на початок XXI ст. вона перемістилась на рідкісноземельні елементи (REE), важкої групи зокрема (HREE), на тлі незгаслого інтересу до легких металів.

За даними Європейської Комісії, в 2011 р. існувало 14 видів критично важливої сировини (*Critical Raw Materials* — CRM), тобто такої, для якої не існує замінників у разі ви-

Цитування: Кульчицька Г.О., Черниш Д.С. База даних мінералів рідкісних елементів України. *Мінерал. журн.* 2023. 45, № 2. С. 49—61. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.02.049>

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2023. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

користання сучасних технологій виробництва [29]. 2020 року число CRMс сягнуло 30 найменувань, 2023 р. зросло ще на чотири одиниці [43]. Протягом цих років відчувалась постійна потреба в Sb, Be, Co, Ga, Ge, In, Nb, REE, W і елементах платинової групи (PGE). В останні роки до них долучились V, Hf і P, а також деякі види мінеральної сировини (графіт, флюорит, циркон тощо). Складно передбачити, яка група елементів зацікавить промисловість завтра, особливо тепер, коли зріс попит від військової галузі. За прогнозом Європейської Комісії, до 2030 р. потреби у Li і Co для акумуляторів зростуть відповідно у 18 і п'ять разів, до 2050 р. — в 60 і 15 разів. Необхідність у REE до того часу збільшиться в 10 разів. Щоб не доганяти потреби промисловості, українські мінералоги повинні створити базу мінералів RE, зафіксувавши таким чином не лише вже відомі їх родовища і рудопрояви, а й усі точки мінералізації цих елементів як потенційні локації зруденіння. Але насамперед потрібно визначити, які елементи вважати рідкісними.

Еволюція поняття "рідкісні елементи". Існують різні способи класифікації хімічних елементів: за періодами, групами, будовою зовнішньої оболонки, хімічними властивостями, поширенням тощо. Найпростіший поділ за властивостями включає три групи: метали, куди належить більшість елементів, неметали, згруповані у верхньому правому кутку періодичної таблиці, і шість напівметалів або металоїдів (B, Si, Ge, As, Sb, Te), що розділяють дві перші групи [39]. У дрібніших класифікаціях виділяють метали лужні, лужноземельні, перехідні, амфотерні (постперехідні), рідкісноземельні (лантаніди) і радіоактивні (актиніди), в інших класифікаціях — благородні, чорні й кольорові метали тощо. Серед неметалів — галогени та інертні (благородні) гази. Зазначимо, що межі між деякими групами, так само як назви груп, не є однозначними. Коливається число неметалів і напівметалів, лантаніди об'єднують у групу REE разом з Y (REY), навіть зі Sc, виокремлюють групи радіоактивних (з порядковим номером >84 і декілька легких) і трансуранових елементів (N > 92) тощо.

Геохіміки класифікують елементи на підставі їхнього вмісту (поширеності), поведін-

ки та розподілу в земній корі, Землі і Космосі [32, 33]. За вмістом у мінералах (мас. %) виділяють елементи головні (>0,4), що визначають структуру і властивості певної фази, другорядні (0,1—0,4) і мікроелементи (<0,1), роль яких пасивна [32]. Мікроелементи розсіяні у структурі мінералу або містяться як мікроскопічні фази-включення. За поведінкою у геологічних процесах виділяють елементи літо-, сидеро- і халькофільні, атмо- і органофільні, флюїдомобільні. Космохімічна класифікація базується на температурі конденсації хімічних елементів.

Найвідоміші геохімічні класифікації В. Вернадського (1927) і В. Гольдшміда (1937) не містять такої категорії як рідкісні елементи. Сто років тому В. Вернадський виділив шість геохімічних груп елементів: благородні гази, благородні метали, циклічні метали, розсіяні елементи, сильно радіоактивні елементи та елементи рідкісних земель. До розсіяних він відніс 11 елементів (Li, Sc, Ga, Br, Rb, Y, Nb, In, I, Cs, Ta), що не утворюють або майже не утворюють хімічних сполук ні на окремих ділянках, ні загалом у земній корі [5].

Геологічні словники радянського періоду спочатку трактували рідкісні елементи як противагу петрогенним, якими сформована основна маса гірських порід. Якщо врахувати, що в будові земних надр беруть участь 82 стабільних елементи з періодичної таблиці [33], а петрогенних елементів — 12, максимум 15, виходить, що решту 67—70 елементів слід віднести до рідкісних. У геологічних словниках (Москва: Госгеоліздат, 1955, 1960) зазначено, що до рідкісних металів зазвичай відносять Sn, W, Mo, Bi, Sb, Hg, V, Cd, Ga, In, Ge, Tl, REE (Ce, La тощо). Про Y не згадано. Тут ключове слово "зазвичай", що свідчить про відсутність чіткого критерію для виділення категорії RE, рідкісних металів зокрема.

Пізніші геологічні словники (Москва: Недра, 1973, 1978) не дають переліку RE, але наводять їхні критерії: 1) незначне поширення у земній корі; 2) розсіяність, тобто мала концентрація в родовищі або відсутність родовищ; 3) складнощі вилучення із застосуванням сучасних технологій. Через складнощі вилучення на початку минулого сторіччя рідкісним вважали навіть Al. Одночасно в словнику підкреслено відносність зазначе-

них критеріїв, особливо тих, що стосуються технології вилучення. Словники містять також статтю про елементи розсіяні (за В. Вернадським, але без йоду), синонімами яких вважають елементи-супутники (Cd, In, Ge, Ga, Re, Hf), тобто такі, що розсіюються як ізоморфні домішки в інших мінералах і вилучаються попутно. Існував також технічний критерій РЕ. "Советский энциклопедический словарь" (Москва: Советская энциклопедия, 1981) трактує їх як елементи, які не мають значного застосування у техніці.

Ми не знайшли трактування терміну *rare elements* в англомовній літературі. Він існує виключно як кларковий показник, з визначеним діапазоном вмісту елемента у земній корі 1—0,01 ppm, поряд із такими термінами як *abundant* (100—1000), *uncommon* (1—100) і *very rare elements* (<0,1 ppm) [38]. Трапляється також термін *rarest elements*, що об'єднує дев'ять низьокларкових елементів: Te, Re, Au і PGE. Відомі назви *minor*, *rare-scattering*, *dispersed*, *trace elements* для позначення пасивних елементів, що не мають значного поширення. Терміном *rare elements* часто підміняють поняття *rare earth elements*, особливо в техніці та економіці.

Широке вживання терміна "рідкісні елементи", вочевидь, зобов'язане створенню 1953 р. у системі АН СРСР спеціальної лабораторії, яку 1956 р. реорганізували в Інститут мінералогії, геохімії та кристалографії рідкісних елементів (ИМГРЭ). Підсумкова праця цього інституту у вигляді трилогії [6], що стосувалася геохімії, мінералогії і типів родовищ рідкісних елементів, мала великий вплив на подальший розвиток цілеспрямованих геологічних досліджень на теренах Радянського Союзу і України зокрема. Нинішня цінність цієї великої праці зменшена через засекреченість локалізації рудоносних об'єктів. У ній є таке визначення: рідкісні елементи — це метали і неметали, які порівняно з найпоширенішими елементами беруть незначну участь у будові земної кори, їхній вміст становить соті і менше частки відсотка. Одночасно відмічено умовність такого визначення. Вміст деяких елементів, віднесених до рідкісних, не поступається, а то й превалює над поширеними. Загалом у трилогії розглянуто геохімічні характерис-

тики і поведінку в геологічних процесах 41 хімічного елемента. Серед них шість сидерофільних (Pt, Ru, Rh, Pd, Os, Ir), дев'ять халькофільних (Ga, Ge, Se, Cd, In, Te, Re, Tl, Bi) і 26 літофільних (Li, Be, Sc, V, Rb, Sr, Zr, Nb, Cs, Y, 14 Ln, Hf, Ta). Також у ній свідомо не розглянуто радіоактивні елементи й відзначено нестабільність числа елементів, визнаних рідкісними. Зокрема, з РЕ випали Hg, W, Sn, Mo, що раніше були такими.

З часом перелік РЕ ще більше скоротили. Окрім малого вмісту в земній корі і слабкого мінералоутворення до них з'явилась ще одна вимога — відсутність великих родовищ. З переліку виокремили благородні і радіоактивні метали, в доповнення до Hg, W, Mo і Sn вилучили V і низьокларкові елементи Bi й As. Наприкінці XX ст. до категорії РЕ віднесли 12 літофільних (Y розглядали окремо, REE — разом) та вісім халькофільних елементів [9, 21]. За винятком Ge, усі вони належать до елементів з чітко вираженими металевими властивостями, тому термін РЕ часто ототожнювали з рідкісними металами. Нині лантаніди з Y зазвичай також розглядають окремо. Таким чином, з огляду на використання цього терміну у вітчизняній науковій літературі, перелік рідкісних на початок XXI ст. скоротився до 18 елементів: 10 літофільних — Li, Be, Sc, Rb, Sr, Zr, Nb, Cs, Hf, Ta і вісім халькофільних — Ga, Ge, Se, Cd, In, Te, Re, Tl.

Критерії рідкісних елементів. Як зазначено вище, існували різні геохімічні, мінералогічні і технологічні підстави для віднесення елементів до категорії рідкісних.

1. Одним із головних критеріїв належності елемента до рідкісного є малий кларк. За підрахунками [6], на долю 41 РЕ припадає близько 0,1 % маси земної кори. Проте вміст деяких із них не поступається такому багатюх кольорових та інших металів (табл. 1). Найбільші кларки в Zr, Sr, Rb і Ce, найменші — в In, Cd, Se, Te, Re. За поширеністю Sr і Zr займають 15 і 18 місце серед усіх природних елементів [36]. Масова частка Li на порядок більша такої As, вилученого із переліку РЕ. А якщо врахувати атомну масу елементів, то число атомів As у корі в 200 разів менше, тобто це більш розсіяний елемент, ніж визнаний рідкісним Li. Ще контрастніший

розподіл Sr і W. Останнього, в перерахунок на атоми, в 500 разів менше ніж Sr. Вміст Rb не поступається V і значно перевершує B, Br, Sn, Mo тощо, які до РЕ не належать. Вміст Hg, Bi, Sb менший, ніж такого розсіяного елемента як Hf. Отже, малий масовий

Таблиця 1. Середній склад континентальної земної кори і гідросфери (мас. %) [22] та поширеність у них рідкісних елементів*
Table 1. The average composition of the continental crust and hydrosphere (wt %) [22] and the prevalence of rare elements in them*

Share elements	Elements
<i>In the earth's crust</i>	
$> 10^1$	O, Si
$10^0—10^1$	Al, Fe, Ca, K, Na, Mg
$10^{-1}—10^0$	C, Ti, H, S
$10^{-2}—10^{-1}$	Mn, P, Ba, F, Sr , Cl, Zr , Rb , V
$10^{-3}—10^{-2}$	Cr, Zn, Ce , Ni, Cu, La , Nd , Y , Li , Co, N, Ga , Sc , Nb , Pb, <i>Th</i>
$10^{-4}—10^{-3}$	Pr , Sm , Gd , Dy , Cs, Hf , Be , Er , Yb , <i>U</i> , <i>Sn</i> , Ta , Br, As, Ge , Eu , Ho , W, <i>Mo</i>
$10^{-5}—10^{-4}$	Tb , Tl , I, Tm , Lu , <i>Bi</i> , <i>Cd</i> , <i>Sb</i> , In
$10^{-6}—10^{-5}$	<i>Hg</i> , Se , Ag, <i>Pd</i>
$10^{-7}—10^{-6}$	<i>Pt</i> , Au, Te
$10^{-8}—10^{-7}$	Re
$10^{-11}—10^{-10}$	Ra
<i>In the hydrosphere</i>	
10^1	O, H
$10^0—10^1$	Cl, Na
$10^{-1}—10^0$	Mg
$10^{-2}—10^{-1}$	K, S, Ca
$10^{-3}—10^{-2}$	Br, C
$10^{-4}—10^{-3}$	Sr , B, Si, F
$10^{-5}—10^{-4}$	N, Li , Rb , Ar
$10^{-6}—10^{-5}$	P, I, Ba, Mo
$10^{-7}—10^{-6}$	Fe, U, V, As, Al, Ti, Zn
$10^{-8}—10^{-7}$	Ni, Cs, Cr, Cu, Mn, Se , Ag, W, Xe
$10^{-9}—10^{-8}$	Gd , Ge , Co, <i>Hg</i> , Pb, <i>Bi</i> , Zr , Ga , Y , <i>Sn</i> , Re , Tl
$10^{-10}—10^{-11}$	He, Be , Nb , Au, <i>Sb</i> , La , Nd , Ce , In , Os
$10^{-11}—10^{-10}$	Dy , Sc , Er , Gd , Pr , Sm , Ho , Tm , Tb , Eu
$10^{-12}—10^{-11}$	Yb , Lu , <i>Th</i>
$10^{-13}—10^{-12}$	<i>Ru</i>
$10^{-14}—10^{-12}$	Ra

Примітка. Напівгрубим шрифтом позначено РЕ за [21], курсивом — елементи, які належали до рідкісних раніше.

Note. RE according to [21] is indicated in bold, elements that were previously rare are in italics.

чи атомний кларк не був надійним критерієм для РЕ.

2. Важливим критерієм РЕ вважали неможливе або слабе утворення власних мінералів. Це було близьким до істини у середині минулого сторіччя, коли число видів з РЕ не перевищувало 400 [6, Т. 3]. Нині лише для Li, Be, Zr, Y відомо близько сотні видів для кожного (табл. 2), без урахування відмін, де РЕ містяться як головні домішки. І хоча для Br, I, Mo, Ni, Co, Cr, Sn відомо видів менше, до РЕ їх зараз не відносять. Цікаво, що Te і Se, які знаходяться в останніх рядах за поширенням (табл. 1), випереджають за числом відкритих мінеральних видів такі розповсюджені РЕ як Zr, Sr і Li. Маленькі кларки і слабе мінералоутворення властиве PGE, рідкісний статус яких давно відомий [30].

3. Нині дискредитовано твердження, що рідкісні елементи зовсім або майже не утворюють великих скупчень мінералів-носіїв, що великі родовища цих елементів не існують. В останні десятиріччя ситуація змінилася. Пошуковий бум у зв'язку з потребами промисловості показав, що у світі існують великі родовища REE, які забезпечують світову монополію Китаю щодо цієї сировини. Не існує дефіциту родовищ літєвих мінералів, за поточного рівня попиту промисловість забезпечена ним на 200 років уперед [40]. Найбільші запаси пов'язані з розсіяним

Таблиця 2. Послідовний ряд елементів за числом утворюваних мінеральних видів*
Table 2. Sequential series of elements according to the number of formed mineral species*

Elements**	Number of carrier minerals
O, H, Si, Fe, Ca, Al, Na	3800—1000
S, Mg, Mn, P, Cu, K, As	1000—500
Pb, C, Cl, F, Ti, B, Zn, <i>U</i> , <i>Sb</i> , <i>Bi</i>	500—200
Ba, V, REE, Ag, Te , Be , Se	200—100
Li , Y , <i>Hg</i> , Zr , Nb , Ni, <i>Sn</i> , Cr, Co, Sr , <i>Pd</i>	100—50
Ta , Tl , W, <i>Mo</i> , Au, <i>Pt</i> , Ge , <i>J</i> , Cd , Cs , <i>Th</i> , Sc , <i>Ir</i> , In , <i>Rh</i>	50—10
<i>Br</i> , <i>Ru</i> , Ga , Os, Rb , Re , Hf , <i>Ra</i>	10—1

* Складено за даними [35]. ** У порядку зниження числа видів. Умовні позначення ті самі, що в табл. 1.

* Compiled according to [35]. ** In descending order of species number. Legend are the same as in Table 1.

Li в солончаках Чилі. Прикладом багатого Zr зруденіння є Азовський і Яструбецький шток на Українському щиті, про які стало відомо порівняно недавно [1].

4. Із глобалізацією світової економіки з'явився ще один критерій — економічний. Вище було відмічено, що за даними Європейської Комісії [29] до категорії критично важливої сировини у 2020 р. потрапили Sb, Co, W, B і P — елементи, які не вважали або перестали вважати рідкісними. 2023 року список CRMs поповнили Cu і Ni як стратегічна сировина, хоча ще не критична [43]. Причини можуть бути і геологічними (вичерпування запасів), і економічними (зниження рентабельності видобутку), і монополізація сировинних ресурсів. Експорт деяких видів сировини до ЄС з низки країн відбувається монополно або близько до того (% експорту в дужках): Sr (100) з Іспанії, LREE (99), HREE (98) і Bi (93) — з Китаю, Nb (85) з Бразилії, Li (78) з Чилі, B (98) і Sb (62) з Туреччини, що збільшує ризики утворення дефіциту цих металів.

Британська геологічна служба (BGS) склала інтегрований "індекс ризику", в якому оцінила хімічні елементи стосовно ризиків дефіциту. Окрім поширення в земній корі і запасів, взаємозамінності сировини і рівня її переробки, в індексі враховано концентрацію видобутку і виробництва [46]. Адже дефіцит сировини може виникнути лише через те, що найбільші виробники скоротять її експорт або через політичну нестабільність у країні-експортері. Якщо елемент рідкісний, але його родовища відомі повсюдно, його індекс ризику менший ніж елемента з більшим кларком, родовища якого контролює монополіст. Нині такими великими монополістами є Китай (контролює понад 50 % елементів списку), Австралія, Росія, США і Чилі. Найризикованіша ситуація 2011 р. склалася із Sb, Hg, W, REE і PGE. 2015 року до першого десятка ризикованих увійшли REE, Sb, Bi, Ge, V, Ga, Sr, W, Mo, Co. Разом з As вони посунули навіть дуже рідкісні за поширенням PGE [42].

Отже, поняття "рідкісні елементи" належить до умовних. Критерії належності до цієї категорії з часом змінювалися. Геохімічні і мінералогічні підстави вважати елементи рідкісними поступово тісно переплелися з

технологічними і економічними. Унаслідок подальшого геологічного і мінералогічного вивчення земної кори, розвитку технологій, запитів промисловості, економічних показників, монополізації запасів і навіть політичної стабільності у країнах-поставниках перелік малопоширених у земній корі хімічних елементів, які відносили до рідкісних, зазнавав змін. Одні елементи позбавлялися такого статусу, інші, дефіцит яких відчувала промисловість, долучали до переліку рідкісних. Перед Європейським Союзом уже постала проблема Co, Ti, P [29]. Сучасні воєнні події висвітлювали і актуалізували ще попит на W для снарядів до HIMARS і збіднений U для броні танків Abrams. Не за горами дефіцит Cu, Pb і Zn, адже кларки Cu і Zn зіставні з кларком Ce, а кларк Pb втричі менший такого Nd [27]. Можна не сумніватися, що дуже скоро список мінералів РЕ поповниться видами, збагаченими на ізотопи певних елементів [4]. У січні 2021 р. Державна служба геології та надр України презентувала 30 об'єктів з мінералами майбутнього [16]. Серед них мінерали Ti, Ni, Co, Cr, Mo (окрім інших мінералів РЕ). Ni, Co, Cu, Zn, Pb зазначено в оглядах Міжнародного енергетичного агентства як критичні елементи майбутнього для зеленої енергетики [44]. Список CRMs (в інших зведеннях — *critical minerals*), основу якого складають малопоширені в земній корі хімічні елементи, з року в рік збільшується. До переліку критичних періодично потрапляють майже усі земні елементи з кларком $\leq 100 \text{ ppm}$ (навіть деякі з кларком $\leq 1000 \text{ ppm}$), рідкісні в земній корі і дефіцитні в промисловості, розширяючи таким чином усталений у геологічній літературі перелік рідкісних елементів. Хоча їхній сумарний вміст у земній корі складає $< 0,15 \text{ мас. \%}$, нині без цих елементів неможливо уявити розвиток сучасних галузей промисловості.

Група РЕ — неоднорідна, у її межах існують менші групи і підгрупи. Їх виділяють за хімічними властивостями (метали, неметали, лужні рідкісні метали тощо), мінералогічними (видоутворювальні, розсіяні, елементи-супутники) і геохімічними (літофільні, сидерофільні, халькофільні тощо) характеристиками, за використанням (для електроніки, акумуляторів, боєприпасів, ювелірної

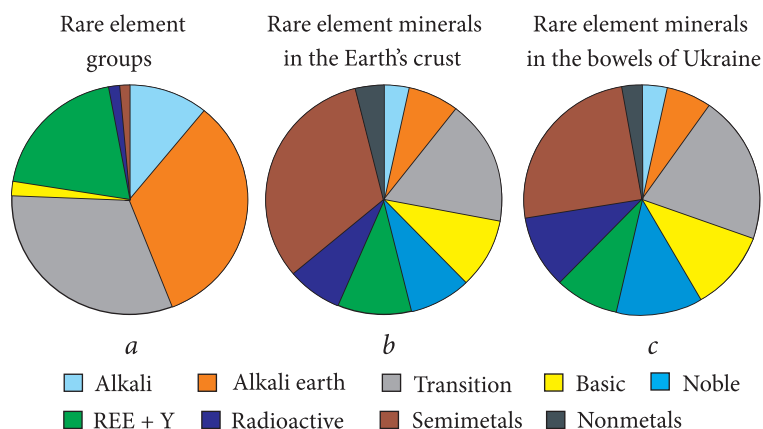


Рис. 1. Співвідношення груп РЕ (а) і мінералів-носіїв цих РЕ (b, c) у земній корі (b) та надрах України (c)

Fig. 1. Ratio of RE groups (a) and carrier minerals of these REs (b, c) in the Earth's crust (b) and in the bowels of Ukraine (c)

справи тощо). Такі групи як радіоактивні елементи, REE, благородні метали, поліметали вигідно вирізняються тим, що близькість хімічних властивостей елементів у групі здебільшого служить запорукою взаємозаміни їх у виробничих технологіях. Генезис мінералів-носіїв цих елементів часто також збігається. Оскільки однією із цілей мінералогічних досліджень є нагромадження сировинної бази держави для потреб промисловості, мінерали-носії РЕ доцільно згрупувати не за геохімічними, а за хімічними властивостями елементів: мінерали лужних (Li, Rb, Cs), лужноземельних (Be, Sr, Ra), перехідних (Sc, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W, Re, Cd, Hg), амфотерних (Ga, In, Sn, Tl, Bi), благородних (Pt, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Au, Ag), рідкісноземельних (Y, La,

Ce та інші лантаніди) і радіоактивних (Th, U) металів, напівметалів (B, Ge, As, Sb, Te), неметалів і галоїдів (Se, Br, I). Як указано вище, не існує єдиної думки щодо класифікації хімічних елементів за властивостями, тому належність елементів до тієї чи іншої групи може бути вказана по-різному.

Співвідношення груп із мінералами-носіями РЕ з переліку [45] не корелює зі співвідношенням груп цих елементів у земній корі (рис. 1). Очевидним є домінування за поширенням лужноземельних і перехідних елементів унаслідок порівняно великих кларків Sr і Zr відповідно, тоді як за числом видів домінують амфотерні метали, що спричинено значним розмаїттям видів майже всіх елементів цієї групи — As, Sb, B, Se і Te. Підвищений кларк Rb, хоча і на чверть зменшений за останніми даними [28], впливає на збільшення частки лужних металів на одній схемі (рис. 1, a), незіставною з часткою їхніх мінералів на іншій (рис. 1, b). Це лише підтверджує думку [20], що кристалохімічні особливості мінералів є не менш важливим чинником видоутворення, ніж вміст елементів у земній корі. Іноді вони навіть превалюють.

Мінерали РЕ у надрах України. Натепер у надрах України з різною мірою достовірності підтверджено знахідки 900 мінеральних видів, кілька сотень їхніх хімічних і структурних відмін та ще майже півсотні неідентифікованих фаз. Останній варіант бази даних мінералів України, адаптованої до номенклатурних змін у найбільших групах мінералів — амфіболів, тетраедритів, турмалінів, апатитів тощо, опубліковано недавно [18]. У базі шість сотень мінералів належать до ви-

Таблиця 3. Розподілення мінералів рідкісних елементів у надрах України по групах
Table 3. Distribution of minerals of rare elements in the bowels of Ukraine by groups

Rare element groups	The number of mineral species with rare elements	%%
Metals		
Alkali	23	3,7
Alkali earth	36	5,8
Transition	128	20,5
Basic	68	10,9
Noble	72	11,5
Rare earth + Y	65	10,4
Radioactive	63	10,1
Semimetals	154	24,7
Nonmetals + Halogens	15	2,4
Total	624	100

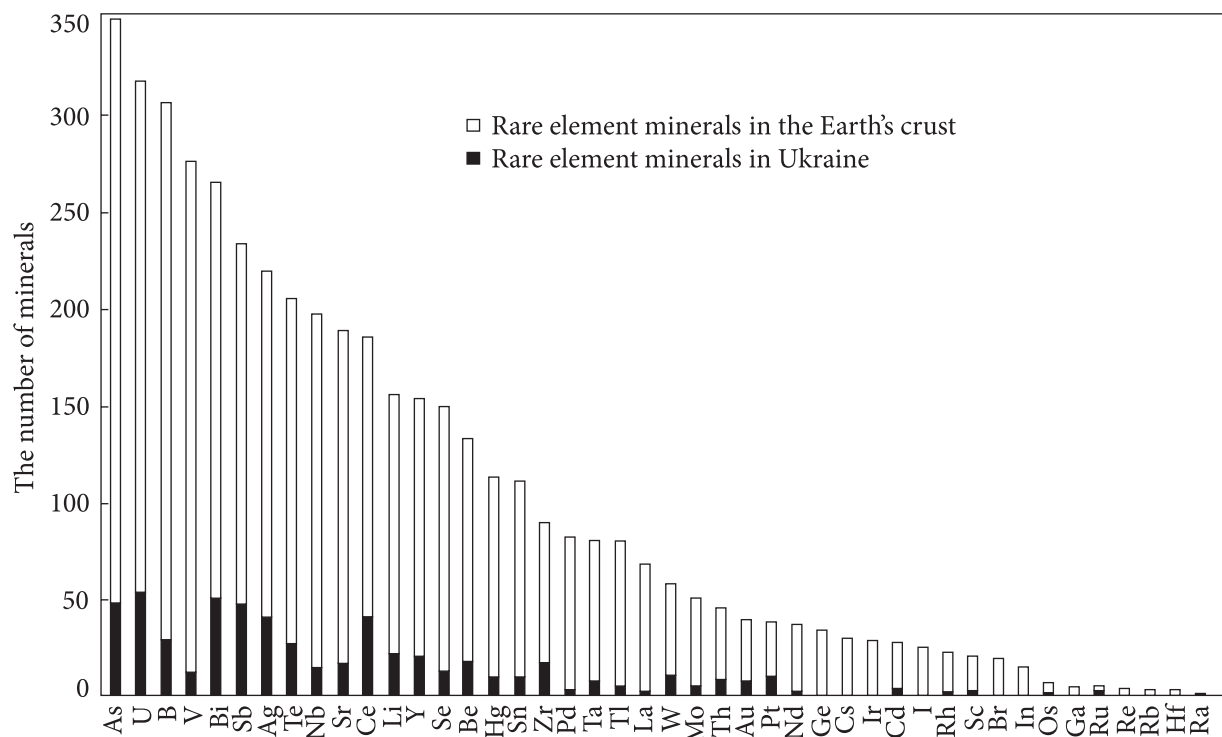


Рис. 2. Число мінеральних видів з рідкісними елементами у світі [45] й Україні

Fig. 2. The number of mineral species with rare elements in the world [45] and Ukraine

дів, у яких перелічені вище РЕ є видоутворювальними або їхня частка в ізоморфній суміші достатня для виділення відміни (наприклад, стрюверит або рутил танталістий) (табл. 3). Зазначимо, що на січень 2023 р. у світі відомо 5900 мінеральних видів, затверджених Міжнародною мінералогічною асоціацією [45]. Понад 4 тис. із них містять РЕ. Наведена у табл. 3 сума мінералів РЕ дещо завищена, оскільки існують види, які одночасно представляють дві (андуїт RuAs_2 , стистайт SnSb) або й три групи (масловіт PtBiTe) рідкісних елементів, та поза сумнівом число мінералів з РЕ у надрах України суттєво переважає число мінералів без них.

Розподілення груп мінералів РЕ в надрах України майже ідентичне такому в земній корі (рис. 1, b, c), надра України особливо не відрізняються від корі в цілому. Різниця лише у числі виявлених видів. Може дещо менше знайдено видів із групи напівметалів, цьому є логічне пояснення. За останні два десятиріччя завдяки аналітичним приладам нового покоління, які дають змогу досліджувати мінеральні фази мікронних розмірів, щорічне число відкритих у світі нових міне-

ралів As, Sb, B, Te зросло в два-три рази [11]. Особливість нововідкритих мінералів полягає у тому, що зазначені елементи в різному валентному стані розподілені по різних позиціях їхніх структур. Діагностика таких мінералів потребує комплексного аналітичного дослідження. В Україні доступ до відповідних приладів обмежений, хоча повідомлень про неідентифіковані фази цих елементів цілком достатньо. Особливо перспективними щодо виявлення нових мінералів елементів цієї групи є різні землісті маси і твердофазові включення в інших мінералах.

Зіставлення числа знахідок видів рідкісних елементів в Україні зі знахідками у світі (рис. 2) виявляє ступінь вивченості їхніх потенційних руд у нашій країні. Мінералів усіх РЕ, за винятком Th, Te, Au і PGE, в Україні знайдено менше чверті з відомих. Досить високе число знахідок зафіксовано для мінералів Ce, та це лише через недостатнє визначення всього спектра REE у цих мінералах. Аутсайдерами є мінерали As, V, Sr, B і Tl, також мінерали REE (окрім церієвих). Нині в Україні діагностовано лише два мінерали La і під питанням — два мінерали Nd. Не зна-

ходить пояснення мала частка знайдених мінералів Nb.

Знахідки власних мінералів розсіяних елементів, таких як Ga, Ge, Re, Hf, In, Rb, Cs тощо, дуже рідкісні і мають більш наукове, ніж практичне значення. Як елементи-супутники їх вилучають із руд інших металів і вугілля. В Україні не знайдено жодного мінералу Ga, та це не заважало їй у 2016 р. зайняти друге місце (після Китаю) серед експортерів цього металу. Щоправда, Китай експортував у 30 разів більше. Подібна ситуація з Ge. Станом на 2019 р. Ga, Ge і U були єдиними рідкісними металами, експортованими з України [41], хоча в надрах нашої країни є чимало об'єктів, в яких породоутворювальні мінерали відомі як носії RE або їх можна попутно вилучати із руд. Власні мінерали Rb у нашій базі відсутні, проте кларк цього елемента в пертозитах Пержанської зони, що вчетверо перевищує середні значення для земної кори [21], спонукає звернути увагу на породоутворювальний мікроклін-пертит як руду Rb. Для розсіяного Sc рудою слугуватиме егірин ураноносних метасоматитів або самі залізні руди [8]. У світі відомий лише один мінерал Hf, його знахідки в Україні невідомі, та рудою для нього може стати альвікіт — багата на Hf відміна циркону. Особливо високою гафнієністю виділяється циркон із бердичівських і сирницьких гранітів [21]. Отже, база даних мінералів RE не може бути обмежена лише видами з RE (мінералами-концентраторами), вона повинна охопити всі мінерали, тією чи іншою мірою збагачені на ці елементи (мінерали-носії). Таке розділення [20] є досить умовним, бо концентрація рідкісного елемента у деяких відмінах може бути більшою, ніж у мінеральному виді [35]. Визначальна роль належатиме економічній доцільності. Чим розсіяніший елемент, тим нижчий поріг збагачення для використання його як руди. Суттєвим підґрунтям для мінералогічного вивчення стануть результати геохімічних досліджень геологічних комплексів України, яких напрацьовано чимало.

Поширенню мінералів RE в Україні присвячено багато праць. Увага приділена і мінералам окремих RE [3, 17, 20, 34 та ін.], і групам елементів [12, 13, 15, 19 та ін.], і комплексній рідкіснометалевій мінералізації [2, 8,

23 та ін.]. Аналіз найважливіших родовищ і рудопроявів RE в Україні зібрано в працях [14, 31, 37]. В останні десятиріччя, після детального мінералогічного дослідження порід Азовського штоку, Анадольської "дайки", Покрово-Київського і Чернігівського масивів, база даних мінералів RE поповнилася, окрім мінералів REY [13], знахідками мінералів Sr [24, 25], Nb, Ta [10] та Zr [26] у лужних породах Східного Приазов'я, новим для України мінералом Sr — строналситом, у карбонатах Західного Приазов'я [7].

Проте до створення повноцінної бази даних для мінералів RE ще далеко. Складна ситуація з мінералами з надгрупи пірохлору. Різноманітні відміни із груп пірохлору, мікроліту, ромеїту неможливо прив'язати до сучасної номенклатури у надгрупі пірохлору без повторного аналізу їхнього хімічного складу сучасними методами. Із 13 мінералів з формульним Sr третина вимагає підтвердження виду. У базі даних є понад шість десятків мінералів REE, діагностованих на підставі електронно-зондового рентгенівського мікроаналізу, який не дає змоги визначати вміст індивідуальних REE. Широке застосування чутливіших електронних зондів сприятиме визначенню співвідношення REE в мінералах і виявленню нових видів. Під сумнівом знахідки мінералів Re і Ge, структурних підтверджень потребують модифікації сульфідів Cd тощо. Деякі відміни мінералів із власними назвами, згадувані у публікаціях, мінералогічні словники інтерпретують по-різному, що вимагає звернення до першоджерел публікацій. Пошуку першоджерел вимагає також інформація про непідтверджені види, згадка про які переколює з одного переліку мінералів України в інший.

Відносно скромна база мінералів RE в Україні може і повинна бути доповнена новими знахідками. Причому до уваги слід брати мінерали всіх елементів із меншим за 100 ppm кларком, які, можливо, нині ще не дефіцитні, але неминуче ними будуть у близькому майбутньому. Особливу увагу слід приділити мінералам перехідних елементів — Ni, Co, Cu, Zn, Pb, за якими майбутнє розвитку зеленої енергетики. Адже це золотий запас, у прямому і переносному значенні, нашої держави.

Висновки. 1. Поняття "рідкісні елементи" належить до умовних. Воно постійно змінюється залежно від геологічного і мінералогічного вивчення земної кори, розвитку технологій, запитів промисловості, економічних показників і монополізації запасів країнами-поставниками.

2. Перелік РЕ, що існував на рубежі ХХ—ХХІ ст., запропоновано доповнити іншими елементами, з кларком ≤ 100 ppm, сумарний вміст яких у земній корі не перевищує 0,15 % її маси. Загалом до переліку потрапляють майже всі природні елементи, за винятком 12—15 пороодоутворювальних. Розширення списку CRMс сприятиме залученню до категорії рідкісних усе більшого числа елементів.

3. Натепер в Україні відомо близько 600 мінеральних видів, які можна вважати мінералами-носіями РЕ. Серед них власні мінерали

РЕ, а також відміни інших видів, збагачені на РЕ. Пропонуємо дослідити поширення мінералів-носіїв РЕ у надрах України, згрупувавши їх на підставі хімічних властивостей елементів, що практично збігається з їхнім використанням у галузях промисловості: мінерали рідкісних лужних, лужноземельних, перехідних, амфотерних, рідкісноземельних і радіоактивних металів, напівметалів, неметалів і галоїдів. Базу даних мінералів РЕ потрібно доповнити носіями низьокларкових перехідних елементів — Cu, Co, Cr, Ni, Zn і Pb, які прогнозують як елементи майбутнього.

4. Створення повноцінної бази даних для мінералів РЕ в Україні — актуальне завдання, вирішення якого направлене на запобігання ризику дефіциту критично важливої сировини, насамперед усередині держави.

ЛІТЕРАТУРА

1. Азовское редкоземельное месторождение Приазовского блока Украинского щита. Под ред. А.Н. Пономаренко, А.В. Анциферова. Донецк: Ноулидж, 2012. 374 с.
2. Бондаренко С.М. Самородное золото в рудах Au-As типу (Український щит). *Мінерал. журн.* 2015. 37, № 1. С. 34—44. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.37.01.034>
3. Бондаренко С.М., Сьомка В.О., Степанюк Л.М., Грінченко О.В. Нові дані з мінералогії уранового зрудення калій-уранової формації Українського щита. *Зап. Укр. мінерал. т-ва.* 2012. 9. С. 45—58.
4. Вальтер А.А. Мінералогічний аспект існування зазвичай рідкісних ізотопів у природно чистому стані. *Зап. Укр. мінерал. т-ва.* 2010. 7. С. 5—17.
5. Вернадский В.И. Очерки геохимии. *Вибрані наукові праці академіка В.І. Вернадського.* Т. 7. *Праці з геохімії та радіогеології.* Кн. 1. Київ, 2012. С. 266—307.
6. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов: в 3 т. Гл. ред. К.А. Власов. Москва: Наука, 1964. Т. 1. Геохимия редких элементов. 687 с.; Т. 2. Минералогия редких элементов. 830 с.; Т. 3. Генетические типы месторождений редких элементов. 860 с.
7. Дубина О.В., Кривдік С.Г., Вишневський О.А. Рідкісноземельні мінерали в жильних нефелінових сієнітах Чернігівського карбонатитового масиву (Приазов'я). *Мінерал. журн.* 2022. 44, № 1. С. 71—79. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.01.071>
8. Евтехов В.Д. Минералогия комплексных скандий-ванадий-железных руд Северного района Криворожского бассейна. *Мінерал. журн.* 1994. 16, № 5/6. С. 37—45.
9. Иванов В.В., Юшко-Захарова О.Е., Борисенко Л.Ф., Овчинников Л.Н. Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным редким металлам. Москва: Недра, 1989. 462 с.
10. Кривдік С.Г., Шаригін В.В., Дубина О.В., Моргун В.Г., Томурко Л.Л. Та-Nb мінералізація в лужних породах Східного Приазов'я (Україна). *Мінерал. журн.* 2018. 40, № 3. С. 39—64. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.40.03.039>
11. Кульчицька Г.О., Павлишин В.І., Черниш Д.С., Герасимець І.М. Першочергові завдання і перспективи регіональної мінералогії України. *Мінерал. журн.* 2016. 38, № 3. С. 3—8. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.03.003>
12. Кульчицька Г.О., Черниш Д.С. Мінерали рідкісних елементів у геологічних комплексах України. *Від мінералогії і геонозії до геохімії, петрології, геології та геофізики: фундаментальні і прикладні тренди ХХІ ст. (MinGeoIntegration XXI).* 36. пр. Всеукр. конф. Київ, 28—30 верес. 2022 р. Київ: КНУ ім. Т. Шевченка, 2022. С. 49—53. URL: http://www.geol.univ.kyiv.ua/ua/conf/Mingeo2022_materials.pdf (дата звернення: 27.03.2023).
13. Кульчицька Г.О., Черниш Д.С., Герасимець І.М. Мінерали рідкісноземельних елементів у породних комплексах України. *Від мінералогії і геонозії до геохімії, петрології, геології та геофізики: фундаментальні і прикладні тренди ХХІ ст. (MinGeoIntegration XXI).* 36. пр. Всеукр. конф. Київ, 23—25 верес. 2020 р. Київ: КНУ ім. Т. Шевченка, 2020. С. 47—51. URL: http://www.geol.univ.kyiv.ua/docs/conf/Mingeo2020_materials.pdf

14. Мельников В.С., Павлишин В.И., Бугаенко В.Н., Семка В.А. Редкие элементы Украины. *Минерал. журн.* 1998. **20**, № 1. С. 92—107.
15. Минерализация олова, вольфрама и молибдена в Украинском щите. Под ред. С.В. Нечаева. Киев: Наук. думка, 1986. 212 с.
16. Мінерали майбутнього. Презентація інвестиційного потенціалу України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/minerali-majbutnogo-prezentaciya-investicijnogo-potencialu-ukrayini> (дата звернення: 27.03.2023).
17. Нечаев С.В., Бондаренко С.Н. Таллиевые минералы Украинского щита. *Минерал. журн.* 1993. **15**, № 1. С. 75—79.
18. Павлишин В., Матковський О., Довгий С. Історія мінералогії в Україні: від 90-х років ХХ ст. донині. Київ, 2023. 610 с.
19. Павлишин В.И., Вовк П.К. Редкие щелочные элементы в минералах камерных пегматитов. *Минерал. сб. Львов. ун-та.* 1971. № 25, вып. 1. С. 27—37.
20. Павлишин В.І., Чернієнко Н.М. Літій у надрах України. Частина 1. Поширення й форми знаходження літію в мінеральних комплексах України. *Мінерал. журн.* 2023. **45**, № 1. С. 3—20. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.01.003>
21. Редкие элементы Украинского щита. Отв. ред. И.П. Щербань. Киев: Наук. думка, 1986. 256 с.
22. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. Под ред. А.П. Соловова. Москва: Недра, 1990. 335 с.
23. Сьомка В.О., Мельниченко Б.Ф., Бондаренко С.М., Грінченко О.В., Сьомка Л.В. Мінеральний склад вольфрамітоносних грейзенів Жовторіченського рудного поля (Криворізько-Кременчуцька шовна зона). *Геохімія та рудоутворення*. 2011. Вип. 30. С. 69—75.
24. Шаригін В.В., Кривдік С.Г. Мінерали рідкісних елементів у маліньїтах Покрово-Киріївського масиву (Україна) та їхній петрогенезис. *Мінерал. журн.* 2017. **39**, № 1. С. 19—35. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.01.019>
25. Шаригін В.В., Кривдік С.Г. Мінерали рідкісних елементів у ювітах Покрово-Киріївського масиву (Приазов'я, Україна). *Мінерал. журн.* 2018. **40**, № 2. С. 3—16. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.40.02.003>
26. Шаригін В.В., Кривдік С.Г., Дубина О.В. Нові знахідки рідкісних мінералів у лужних породах Українського щита. *Мінерал. журн.* 2020. **42**, № 4. С. 3—22. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.42.04.003>
27. Abundance of elements in the earth's crust and in the sea. *CRC Handbook of Chemistry and Physics (97th ed.)*. Haynes, W.M. (Ed.). CRC Press, 2016. P. 14—17. <https://doi.org/10.1201/9781315380476>
28. Abundance of the chemical elements in Earth's (continental), according to various sources. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Abundance_of_the_chemical_elements (дата звернення: 11.01.2023).
29. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. *Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions*. Brussels, 3.09.2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474> (дата звернення: 01.02.23).
30. Herrington R. Collecting the periodic table's rarest elements: osmium, rhodium and iridium. 20 February 2019. URL: <https://naturalhistorymuseum.blog/2019/02/20/collecting-the-periodic-tables-rarest-elements-osmium-rhodium-and-iridium-iypt2019> (дата звернення: 08.01.2023).
31. Kryvdik S.G., Melnikov V.S., Zagnitko V.M., Strekozov S.N. Endogenic deposits of rare metals in the Ukrainian Shield (Ukraine). *Mineral. Journ.* 2002. **24**, № 2/3. P. 26—36.
32. Lee C.T. Geochemical Classification of Elements. *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham., 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39312-4_255
33. Marshall, C.P. Chemical element. *Encyclopedia of Planetary Science. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Dordrecht, 1997. P. 103—104. https://doi.org/10.1007/1-4020-4520-4_66
34. Melnikov V., Jeleň S., Bondarenko S., Balintová T., Ozdin D., Grinchenko A. Comparative Study of Bi-Te-Se-S Mineralizations in Slovak Republic and Transcarpathian Region of Ukraine. Part 2. Crystal Chemistry and Genesis of Layered Bi-Tellurides. *Мінерал. журн.* 2010. **32**, № 1. С. 38—44.
35. Mineral by Chemical Composition. URL: http://webmineral.com/chemical.shtml#Y_kRm3bP1PY (дата звернення: 30.01.2023).
36. Most Abundant Elements in Earth's Crust. URL: <https://www.worldatlas.com/articles/the-most-abundant-elements-in-the-earth-s-crust.html> (дата звернення: 08.01.2023).
37. Nechaev S.V., Gursky D.S., Bakarzhiev A.Kh., Voinovsky A.S., Isakov L.V., Makivchuk O.F. Deposits of Uranium, Rare and Rare-Earth Metals in the Ukrainian Shield. *Мінерал. журн.* 2002. **24**, № 4. С. 5—20.
38. Periodic table (metal abundance in Earth crust). URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metal> (дата звернення: 08.02.2023).
39. Placing the Elements in the Periodic Table. URL: <https://infinitylearn.com/surge/chemistry/periodic-classifications/> (дата звернення: 07.02.23).
40. Rapier R. The World's Top Lithium Producers. Dec 13, 2020. Forbes. URL <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2020/12/13/the-worlds-top-lithiumproducers/?sh=3fb6b3945bc6> (дата звернення: 30.01.23).

41. Reichl C., Schatz M. World Mining Data 2022. *Minerals Production*. 2022. Vol. 37. Vienna. 267 p. URL: <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf> (дата звернення: 07.02.23).
42. Risk list 2015 — Current supply risk for chemical elements or element groups which are economic value. British Geological Survey. URL: https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/statistics/risk_list_2015.pdf (дата звернення: 27.03.2023).
43. Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023. Final Report. URL: <https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2023-03/Study%202023%20CRM%20Assessment.pdf> (дата звернення: 27.03.2023).
44. Targeted Critical Minerals and Metals List. IEA. URL: <https://www.iea.org/policies/15877-targeted-critical-minerals-and-metals-list> (дата звернення: 27.03.2023).
45. The official IMA-CNMNC List of Mineral Names. URL: <http://cnmnc.units.it/> (дата звернення: 30.01.2022).
46. Thomas G.P. Five of the Rarest Resources in the World. 2019. URL: <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=49> (дата звернення: 08.01.2023).

Надійшла 25.02.2023

REFERENCES

1. Ponomarenko, A.N. and Antsiferov, A.V. (eds) (2012), *The Azov rare-earth deposit of the Azov sea region megablock of Ukrainian Shield*, Noulidzh press, Donetsk, 374 p. [in Russian].
2. Bondarenko, S.M. (2015), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 37, No. 1, Kyiv, UA, pp. 34-44 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.37.01.034>
3. Bondarenko, S.M., Syomka, V.O., Stepanyuk, L.M. and Grinchenko, O.V. (2012), *Proc. Ukr. Mineral. Society*, Vol. 9, UA, pp. 45-58 [in Ukrainian].
4. Valter, A.A. (2010), *Proc. Ukr. Mineral. Society*, Vol. 7, UA, pp. 5-17 [in Ukrainian].
5. Vernadsky, V.I. (2012), *Selected scientific works of academician V.I. Vernadsky*. Vol. 7. *Works on geochemistry and radiogeology*, Book 1, Kyiv, UA, pp. 266-307.
6. Vlasov, K.A. (chief ed.) (1964), *Geochemistry, Mineralogy and Genetic Types of Rare Element Deposits*: in 3 vols, Nauka, Moscow. Vol. 1. Geochemistry of rare elements, 687 p.; Vol. 2. Mineralogy of rare elements, 830 p.; Vol. 3. Genetic types of deposits of rare elements, 860 p. [in Russian].
7. Dubyna, O.V., Kryvdik, S.G. and Vyshnevskiy, O.A. (2022), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 44, No. 1, UA, pp. 71-79 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.01.071>
8. Evtekhov, V.D. (1994), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 16, No. 5-6, UA, pp. 37-45 [in Russian].
9. Ivanov, V.V., Yushko-Zakharova, O.E., Borisenko, L.F. and Ovchinnikov, L.N. (1989), *Geological handbook on siderophile and chalcophile rare metals*, Nedra, Moscow, RU, 462 p. [in Russian].
10. Kryvdik, S.G., Sharygin, V.V., Dubyna, O.V., Morgun, V.S. and Tomurko, L.L. (2018), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 40, No. 3, UA, pp. 39-64 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.40.03.039>
11. Kulchytska, H.O., Pavlyshyn, V.I., Chernysh, D.S. and Herasimets, I.M. (2016), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 38, No. 3, UA, pp. 3-8 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.03.003>
12. Kulchytska, H.O. and Chernysh, D.S. (2022), *Zb. prats Vseukr. konf. Vid mineralohiyi i heohnoziyi do heokhimiyi, petrolohiyi, heolohiyi ta heofizyky: fundamentalni i prykladni trendy XXI stolittya (MinGeoIntegration XXI)*, Kyiv, Septem. 28-30, Kyiv, UA, pp. 49-53 [in Ukrainian]. URL: http://www.geol.univ.Kyiv.ua/docs/conf/Mingeo2022_materials.pdf (Accessed: 11.01.2023).
13. Kulchytska, H.O., Chernysh, D.S. and Herasimets, I.M. (2020), *Coll. works of the All-Ukrainian conf.*, Kyiv, Septem. 23-25, Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv, pp. 47-51 [in Ukrainian]. URL: http://www.geol.univ.Kyiv.ua/docs/conf/Mingeo2020_materials.pdf (Accessed: 11.01.2023).
14. Melnikov, V.S., Pavlyshyn, V.I., Bugaenko, V.N. and Syomka, V.A. (1998), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 20, No. 1, UA, pp. 92-107 [in Russian].
15. Nechaev, S.V. (ed.) (1986), *Mineralization of tin, tungsten and molybdenum in the Ukrainian Shield*, Nauk. dumka, Kyiv, UA, 212 p. [in Russian].
16. (2023) *Minerals of the future. Presentation of the investment potential of Ukraine*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/minerali-majbutnogo-prezentaciya-investicijnogo-potencialu-ukrayini> (Accessed: 27.03.2023).
17. Nechaev, S.V. and Bondarenko, S.N. (1993), *Mineral. Journ.*, Vol. 15, No. 1, Kyiv, UA, pp. 75-79 [in Russian].
18. Pavlyshyn, V., Matkovskiy, O. and Dovgiy, S. (2023), *History of mineralogy in Ukraine: from the 90s of the XX century to this day*, Kyiv, 610 p. [in Ukrainian].
19. Pavlyshyn, V.I. and Vovk, P.K. (1971), *Mineral. sb. Lvov un-ta*, No. 25, Vyp. 1, UA, pp. 27-37 [in Russian].
20. Pavlyshyn, V.I. and Cherniyenko, N.M. (2023), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 45, No. 1, UA, pp. 3-20 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.01.003>
21. Shcherban, I.P. (ed.) (1986), *Rare elements of the Ukrainian Shield*, Nauk. dumka, Kyiv, UA, 256 p. [in Russian].
22. Solovov, A.P. (ed.) (1990), *Handbook of geochemical prospecting for minerals*, Nedra, Moscow, RU, 335 p. [in Russian].
23. Syomka, V.O., Melnychenko, B.F., Bondarenko, S.M., Hrinchenko, O.V. and Syomka, L.V. (2011), *Geochemistry and ore formation*, Vyp. 30, Kyiv, pp. 69-75 [in Ukrainian].

24. Sharygin, V.V. and Kryvdik, S.G. (2017), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 39, No. 1, Kyiv, UA, pp. 19-35 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.01.019>
25. Sharygin, V.V. and Kryvdik, S.G. (2018), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 40, No. 2, UA, pp. 3-16 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.40.02.003>
26. Sharygin, V.V., Kryvdik, S.G. and Dubyna, O.V. (2020), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 42, No. 4, Kyiv, UA, pp. 3-22 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.42.04.003>
27. Haynes, W.M. (ed.) (2016), Abundance of elements in the earth's crust and in the sea. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (97th ed.), CRC Press, pp. 14-17. <https://doi.org/10.1201/9781315380476>
28. (2023) *Abundance of the chemical elements in Earth's (continental), according to various sources*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Abundance_of_the_chemical_elements (Accessed: 11.01.2023).
29. (2020) Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. *Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions*. Brussels, 3.09.2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474> (Accessed: 01.02.23).
30. Herrington, R. (2019), URL: <https://naturalhistorymuseum.blog/2019/02/20/collecting-the-periodic-tables-rarest-elements-osmium-rhodium-and-iridium-iypt2019> (Accessed: 08.01.2023).
31. Kryvdik, S.G., Melnikov, V.S., Zagnitko, V.M. and Strekozov, S.N. (2002), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 24, No. 2-3, Kyiv, pp. 26-36.
32. Lee, C.T. (2018), *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39312-4_255
33. Marshall, C.P. (1997), *Encyclopedia of Planetary Science. Encyclopedia of Earth Science*, Springer, Dordrecht, pp. 103-104. https://doi.org/10.1007/1-4020-4520-4_66
34. Melnikov, V., Jeleň, S., Bondarenko, S., Balintová, T., Ozdin, D. and Grinchenko, A. (2010), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 32, No. 1, Kyiv, UA, pp. 38-44.
35. (2023) *Mineral by Chemical Composition*. URL: http://webmineral.com/chemical.shtml#.Y_kRm3bP1PY (Accessed: 30.01.2023).
36. (2023) *Most Abundant Elements in Earth's Crust*. URL: <https://www.worldatlas.com/articles/the-most-abundant-elements-in-the-earth-s-crust.html> (Accessed: 08.01.2023).
37. Nechaev, S.V., Gursky, D.S., Bakarzhiev, A.Kh., Voinovsky, A.S., Isakov, L.V. and Makivchuk, O.F. (2002), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 24, No. 4, Kyiv, pp. 5-20.
38. (2023) Periodic table (metal abundance in Earth crust). URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metal> (Accessed: 08.02.2023).
39. (2023) *Placing the Elements in the Periodic Table*. URL: <https://infinitylearn.com/surge/chemistry/periodic-classifications> (Accessed: 07.02.23).
40. Rapier, R. (2020), *Forbes*. URL <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2020/12/13/the-worlds-top-lithiumproducers/?sh=3fb6b3945bc6> (Accessed: 30.01.23).
41. Reichl, C. and Schatz, M. (2022), *Minerals Production*, Vol. 37, Vienna, 267 p. URL: <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf> (Accessed: 07.02.23).
42. (2023) Risk list 2015 - Current supply risk for chemical elements or element groups which are economic value. British Geological Survey. URL: https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/statistics/risk_list_2015.pdf (Accessed: 27.03.2023).
43. (2023) *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023*. Final Report. URL: <https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2023-03/Study%202023%20CRM%20Assessment.pdf> (Accessed: 27.03.2023).
44. (2023) *Targeted Critical Minerals and Metals List*. IEA. URL: <https://www.iea.org/policies/15877-targeted-critical-minerals-and-metals-list> (Accessed: 27.03.2023).
45. (2022) The official IMA-CNMNC List of Mineral Names. URL: <http://cnmnc.units.it> (Accessed: 30.01.2022).
46. Thomas, G.P. (2019), URL: <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=49> (Accessed: 08.01.2023).

Received 25.02.2023

H.O. Kulchytska, DrSc (Geology), Chief Research Fellow

E-mail: kulchechanna@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7206-4797>

D.S. Chernysh, PhD (Geology), Head of Department

E-mail: chernysh_d@ua.fm; <https://orcid.org/0000-0001-5390-2591>

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine

34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

DATABASE OF RARE ELEMENT MINERALS OF UKRAINE

It is shown that the concept of "rare elements" is rather conditional. The list of rare elements, as well as their selection criteria, constantly changed over time. Geochemical and mineralogical criteria gradually became closely connected with technological and economic criteria. Such criteria as insignificant distribution in the earth's crust, weak mineral

formation, and the lack of large deposits were joined by technological difficulties of extraction, minimal use in technology, unprofitable extraction, or artificial shortages due to monopolization of reserves by supplying companies. The list of critical mineral raw materials, which is based on rare chemical elements, is growing every year, with almost all the elements with a clarke of less than 100 ppm being in short supply. This encourages mineralogists to look out for a wider range of carrier minerals of rare elements than it was before, thus expanding the list of rare elements. It is reasonable to group carrier minerals of rare elements not by geochemical, but by chemical properties of the elements, since similar properties are crucial for their use in the same industries. The mineral database of Ukraine includes about 900 mineral species, and in six hundred of them rare elements are species- and speciation-forming. It is suggested to divide them into the following groups: minerals of alkaline (Li, Rb, Cs), alkaline earth (Be, Sr, Ra), transition (Sc, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W, Re, Cd, and Hg), amphoteric (Ga, In, Sn, Tl, Bi), noble (Pt, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Au, Ag), rare earth (Y, La, Ce and other lanthanides) and radioactive (Th, U) metals, semi-metals (B, Ge, As, Sb, Te), non-metals and halides (Se, Br, I). The database should be supplemented with minerals of such low-clarke transition elements as Cu, Co, Cr, Ni, Zn, and Pb, which are predicted to be the elements of the future. Mineral resources of Ukraine contain significant potential for expanding the database of rare element minerals and increasing the reserves of critical raw materials.

Keywords: rare element groups, critical raw materials, mineral, mineral database of Ukraine.