



ШАНОВНІ КОЛЕГИ!

Реалії сьогодення потребують від мінерально-сировинного комплексу України забезпечення потреб промисловості і сприяння експортному потенціалу. Україна активно освоює стратегічні, критичні мінеральні та вуглеводневі ресурси за програмою Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.

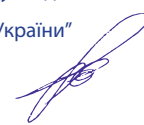
Корисні копалини є екстенсивним чинником розвитку промисловості та бюджету країни. Геологічна галузь має бути пріоритетною і розвиватися в сучасній економіці.

Журнал “Мінеральні ресурси України” започаткував нову рубрику під назвою “СТРАТЕГІЧНІ ТА КРИТИЧНІ МІНЕРАЛЬНІ РЕСУРСИ”, де будуть друкуватись наукові та прикладні дослідження.

До рубрики “СТРАТЕГІЧНІ ТА КРИТИЧНІ МІНЕРАЛЬНІ РЕСУРСИ” запрошуємо авторів з оригінальними статтями з актуальних проблем геології, традиційних і нових підходів досліджень, розробки нових технологій та ефективних методів їх видобутку і переробки.

Чекаємо на ваші наукові розробки та дослідження, які допоможуть поглибити розуміння цих важливих тем і сприятимуть розвитку сучасної науки і технологій у сфері видобутку та використання мінеральних ресурсів, розробки екологічно чистих технологій та збереженню природних ресурсів і зменшенню негативного впливу на довкілля.

Головний редактор журналу “Мінеральні ресурси України”
Ігор Дмитрович Багрій



УДК 552.086:087

doi <https://doi.org/10.31996/mru.2024.2.3-9>

О. І. БІЛОУС, канд. геол.-мін. наук, голов. геолог (ТОВ “Ferrexpo”), a.belous@ferrexpo.com, <https://orcid.org/0009-0000-1201-6008>,
Б. І. СЛОБODЯН, аспірант (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України), sbiv@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0006-6720-1220>,
В. О. ПАРФЕНЮК, голов. геолог (ТОВ “Гео-кратон”), vladymyr.parfenyuk@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-2092-8562>

O. BILOUS, Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Chief geologist (Ferrexpo Services Ltd.), a.belous@ferrexpo.com, <https://orcid.org/0009-0000-1201-6008>,
B. SLOBODIAN, PhD student (M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine), sbiv@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0006-6720-1220>,
V. PARFENIUK, Chief geologist (Geo-craton Ltd.), vladymyr.parfenyuk@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-2092-8562>

ЛІТІЄВІ ПЕГМАТИТИ УКРАЇНИ: ПРОБЛЕМИ І ПЕРЕВАГИ ОСВОЄННЯ РОДОВИЩ

UKRAINE’S LITHIUM PEGMATITES: ISSUES AND ADVANTAGES OF FIELD DEVELOPMENT

Розглянуті перспективи освоєння літєвих родовищ України в контексті загальних тенденцій на світовому ринку. Подано огляд і аналіз різних аспектів, а саме: специфічні умови світового ринку літію, класифікація пегматитових родовищ Європейського Союзу по запасах і якості сировини, економічна значущість мінерального складу руди та комерційні вимоги до якості мінеральних концентратів літію. Наведено порівняння петаліту і сподумену як основних мінералів-носіїв літію в пегматитових родовищах. Показано вплив петаліт-сподуменових пегматитів на економічну значущість конкретного родовища. В зазначеному контексті представлено порівняння двох родовищ літєвих руд України – Шевченківського сподуменового та Полохівського петалітового, які є найперспективнішими щодо економічної доцільності їхнього освоєння. Руди вказаних родовищ придатні для отримання літєвих мономінеральних концентратів з подальшою переробкою їх в літєві хімічні продукти – карбонат літію та гідроксид літію.

Ключові слова: літєві руди, сподумен, петаліт, Полохівське і Шевченківське родовища, Україна.

Lithium contributes to development of high-tech industries around the globe. This article examines economic prospects of the Ukrainian lithium resources in the context of general trends existing on the world market. An overview and analysis of different aspects such as the world market specifics and current trends, size and ore quality of the European pegmatite deposits, economics of lithium-bearing minerals and commercial requirements to the quality of lithium concentrates are given. Pegmatite deposits prospects are categorized according to their estimated reserves. Main types of lithium-ion batteries are described and their preferences for a particular mineral lithium commodity is characterised. Separately, economic significance of the Ukrainian deposits is shown based on comparison between petalite and spodumene pegmatites. It is shown that under conditions of the same method of lithium processing and extraction, the production costs for one tonne of lithium carbonate from petalite concentrate are 1.7 times higher than from spodumene. At the same time, in terms of mineral grades and ore body extensions petalite deposits are comparable with those of many spodumene ones. The higher costs related to lower lithium content per tonne of concentrate are offset by the petalite’s superior purity during the hydrometallurgical processing stage and the requirement of less waste removal during physical concentration. Two important deposits for the Ukrainian industry, Shevchenkivske and Polokhivske, are compared in light of their economic framework. These deposits have been studied to relative detail and are most attractive for mining. Shevchenkivske deposits is localized in the Priazovskiy megablock, Polokhivske – in Ingulskiy megablock (accordingly, Western Priazovskiy and Central Ukrainian metallogenic districts). The ores of the specified deposits are suitable for production of monomineral concentrates with their further processing to lithium chemical products – lithium carbonate and lithium hydroxide. Mineral resources of these deposits have been estimated to a depth of 500 m from the surface. Considerable prospects and challenges for lithium extraction from the Ukrainian deposits is shown.

Keywords: lithium ore, spodumene, petalite, Polokhivske and Shevchenkivske deposits, Ukraine.

Вступ

Останнім часом глобальний попит на літєву мінеральну сировину різко зріс, що зумовлено стратегічним значенням цього металу як екологічно безпечного, найбільш хімічно активного і раціонального. За останніми оцінками, до 2030 р. ЄС потребуватиме літїю в 18 разів більше і ближче до 2050 р. – у 60 разів більше, ніж зараз, а сам літїй віднесений до критичної мінеральної сировини [6]. Тобто, літїй розглядається як гарант забезпечення сталого соціально-економічного зростання та розвитку. Нещодавно Україна заявила про значні запаси літєвих руд [17], і що більш важливо, про також суттєві, але досі не визначені перспективи відкриття нових родовищ.

Аналіз специфічних умов світового ринку

В багатьох публікаціях робиться висновок, що літїй не є рідкісною корисною копалиною та його світові запаси значні, а сучасний стан підвищеного попиту розглядається як чергова спекулятивна “бульбашка” [20]. Але справа в тому, що літїй не так легко утворює великі локальні скупчення, і через це великі родовища літїю насправді є рідкістю. В статистику зазвичай включаються всі перспективні ділянки мінералізації, де вміст літїю вище кларкового, а обсяги й економічна цінність недоведені. Щоб родовище було комерційно життєздатним, воно має містити значні запаси, не бути забрудненим магнієм (для розсолів), залізом (для пегматитів) та марганцем і фтором (для глини). Більше того, статистика вміщує дані по родовищах, де літїй може вилучатися в якості побічного продукту. Компанії, які розробляють або мають плани розробляти такі родовища, є заручниками темпів виробництва основної корисної копалини, і цей статус побічного продукту робить оцінки ресурсів літїю нечіткими. Яскравим прикладом є родовище ядариту в Сербії, де літїй є побічним продуктом вилучення бору [22].

Отже, із 389 родовищ світу, на яких підраховані запаси літїю, тільки 18 (або 0,5 %) розробляються (табл. 1), з яких геологічні служби США та Великобританії розглядають тільки 12 [9, 14] в якості гарантованих постачальників сировини на світовий ринок (рис. 1). Поряд з рідкісними землями ітрієвої групи це майже найнижчий показник у порівнянні з іншими критично важливими типами мінеральної сировини.

Аналіз показує, що на сьогоднішній день постачання літїю на світовий ринок приблизно однаково поділено між родовищами озерних розсолів та пегматитів [13]. Враховуючи те, що поверхневі комерційно привабливі озерні розсоли майже всі відомі і нових масштабних відкриттів не очікується, а розробка їх є капіталомісткою, сезонною, і вони чутливі до концентрацій елементів-домішок, вірогідно, що в перспективі частка корінних, перш за все пегматитових, джерел, має тільки зростати.

При цьому зауважимо, що комерційна технологія вилучення літїю з перелічених в табл. 1 родовищ глини ще не розроблена.

Раніше загальноприйнятим було те, що виробництво карбонату літїю з розсолів було набагато дешевшим порівняно з джерелами кристалічних порід. У зв'язку із нещодавно запровадженою системою податків на надра (роялті) в Чилі, економічна перевага родовищ озерних розсолів втрачена. Щодо кристалічних порід, то майже половина оцінених запасів наразі не є доступною для основного ринку через різні обставини:

– По-перше, наявність запасів ще не означає, що літєву сировину можна вивести на ринок за розумною вартістю. Багато родовищ просто не є економічно привабливими.

– По-друге, ринок літїю є консервативним, лояльність до існуючих постачальників або відомих брендів є дуже сильною; тому літїй не торгується на жодній офіційній або визнаній біржі. По літїю не розроблено жодного стандарту та угоди укладаються безпосередньо між продавцем і покупцем, а умови оплати не повідомляються. До того ж, ціни сильно змінюються в залежності від регіону, форми постачання (карбонат Li_2CO_3 або гідроксид літїю LiOH) та міжнародних комерційних умов (інкотермс В, С або D). Одне це встановлює бар'єр для виходу на ринок нових виробників, і тому високі маркетингові витрати та повільні початкові продажі мають враховуватися.

– По-третє, літїй вже став складовою світової геополітики. До останнього часу Європейський Союз проводив політику декарбонізації, тобто займався перетворенням свого енергетичного сектору в такий, що буде незалежним від викопного палива, а джерела постачання нафти і газу диверсифіковані. З 2020 р. ця політика поширилася на нові технології і метали, що забезпечують виробництво електричної енергії, її зберігання, передачу й ефективність використання (“зелена енергетика”).

Тут доречно вказати на спекулятивну гру, що почали деякі країни. Наприклад, з червня 2023 р. Намібія і Зімбабве заборонили вільний експорт літєвих концентратів, наполягаючи на створенні високотехнологічних підприємств безпосередньо в їхніх країнах [21]. На додачу, Сербія заборонила освоєння великого родовища ядариту, розпочатого компанією Rio Tinto.

Світова енергетична криза, спричинена війною РФ проти України, вже призвела до підвищення вартості зарядки електромобілів, незважаючи на стабільну тенденцію здешевлення вартості електричних батарей [16]. Це може стати перешкодою для продажу електромобілів, а отже, попиту на літїй. Таким чином, для економічного аналізу українських родовищ має значення, який саме тип кінцевого продукту може бути отриманий і де і ким цей продукт використову-

Таблиця 1. Промислове використання родовищ літїю [26]

Геолого-промисловий тип	Кількість родовищ з підрахованими запасами	Кількість родовищ з оціненими ресурсами	Кількість родовищ, що розробляються
Пегматити	125	60	14
Грейзенізовані граніти	11	6	–
Лужні граніти	2	–	–
Вулканогенно-осадові породи	8	2	–
Ураноносні глини	1	–	–
Літїєносні >>	24	8	–
Бороносні >>	4	–	–
Розсоли озерні	170	27	4
Розсоли нафтові	35	8	–
Розсоли геотермальні	9	1	–
Всього	389	112	18

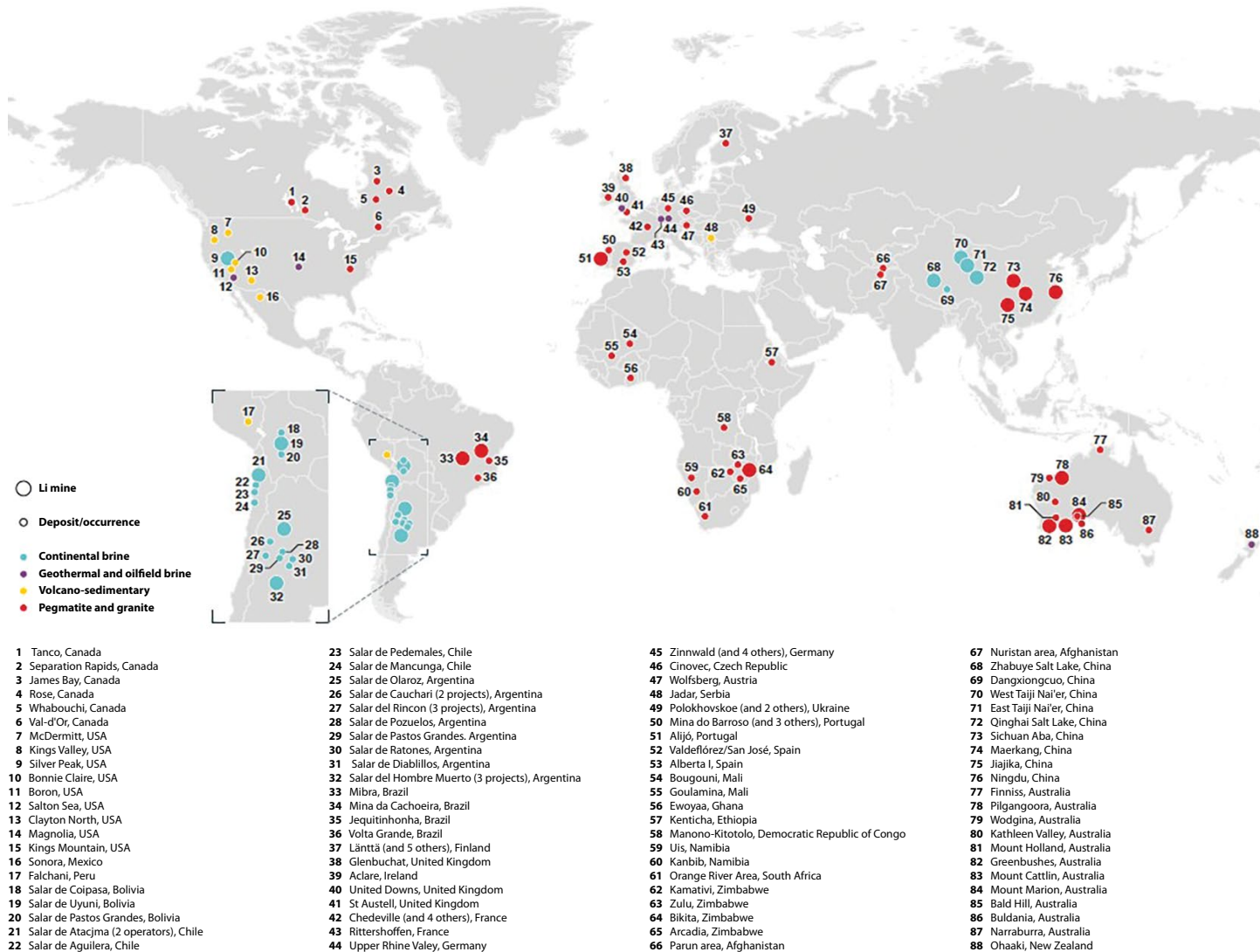


Рис. 1. Розташування родовищ літію в світі (за даними геологічної служби Великобританії [5])

ється. Орієнтація на кінцевого споживача важлива навіть на ранній стадії геологічного вивчення.

Ринок літію є явним ринком олігополії, а це означає, що багато клієнтів стикаються з невеликою кількістю постачальників. Тобто, у контексті розробки нового літієвого проекту витрати на виробництво повинні бути конкурентоспроможними із виробниками, що вже успішно працюють на ринку. Таким чином, перспективи розвитку літієвих проектів

в Україні пов'язані з тим, що на території ЄС значні запаси літієво-вмісних пегматитів майже відсутні, а ті, що відомі мають суттєві перешкоди, які призводять до удорожчання при відпрацюванні. Родовища або складаються із відокремлених невеликих за обсягом рудних тіл, або вміст літію в них занадто низький, або вони мають комплексний мінеральний склад. Останнє явище суттєво ускладнює технологічну схему і робить її занадто вартісною (табл. 2).

Таблиця 2. Родовища літію в Європейському Союзі (за даними корпоративних щорічних звітів)

Родовище, країна	Власник	Статус	Основний мінерал літію	Запаси літій-карбонат-еквівалента, млн т	Вміст Li ₂ O в руді, %
Аліжо, Португалія	Felmica	Видобуток припинений	Лепідоліт	2,97	0,45
Міна до Барросо, Португалія	Savannah Resources	Геологічне вивчення	Сподумен	–	1,16
Sereda, Португалія	Dakota Minerals	Те ж саме	Петаліт	–	1,25
San Jose, Іспанія	Plymouth Minerals	>>	Амблігоніт, літієва слюда	–	–
Wolfsberg, Австрія	European Lithium	Видобуток припинений	Сподумен	0,63	1,50
Cinovec, Чехія	European Metals	ТЕО	Цинвальдит	6,46	0,44
Kaustinen, Фінляндія	Keliber, Nordic	Попереднє ТЕО	Сподумен	0,24	1,19
Somero, Фінляндія	Savannah Resources	Геологічне вивчення	Петаліт	–	–
Varutask, Швеція	Hannas Reward	Попереднє геологічне вивчення	Сподумен	–	–
Spodumene Mountains, Швеція	Dacota Minerals		Сподумен	–	1,00
Jadar, Сербія	Уряд Сербії	Проект припинений	Ядарит	5,58	1,80

Беручи до уваги тільки запаси по видах літєвої сировини, європейські родовища є переважно літєвослюдицистими з незначною часткою чисто сподуменових і петалітових. Тому вартість отримання високоякісного карбонату літію в європейських країнах вища, ніж будь-де у світі. В цьому сенсі родовища України, які переважно мономінеральні петалітові або сподуменові, мають передумови стати конкурентоспроможними на європейському ринку. Перспективи їх освоєння розглянуті нижче.

Класифікація пегматитових родовищ за запасами та якістю сировини

Майже всі дослідники і виробники петалітових та сподуменових родовищ погоджуються, що середній вміст оксиду літію в руді, що дорівнює або вищий за 1 %, є економічно значущим [26]. Відповідно до запасів, з огляду на широкий діапазон тоннажу по родовищах, запропоновано використовувати статистичне визначення порогу економічної привабливості. Найкраще це ілюструється модою в логарифмічному розподілі запасів, що становить приблизно 0,11 млн т літію в перерахунку на метал [13] або 0,59 млн т карбонату літію. З причини того, що вказаний висновок зроблений на основі аналізу всього 20 родовищ, автори цього дослідження доповнили вибірку даними з відкритих джерел ще по 83 родовищах (всього 103 родовища включно з Шевченківським та Полохівським), по яких проведена геолого-економічна оцінка з використанням встановлених кодів звітності CRIRSCO [3, 7, 8, 10, 15, 25]. Результуючий графік показано на рис. 2.

Аналіз графіка дозволяє деталізувати раніше запропоновану статистичну класифікацію запасів літію у такому вигляді:

- Запаси менше 0,011 млн т – ділянки мінералізації.
- Запаси від 0,011 до 0,04 млн т – дуже дрібні родовища, які не мають промислового значення.
- Запаси від 0,04 до 0,11 млн т – дрібні слабо привабливі родовища, які за певних обставин і нарощуванні запасів можуть перейти в клас інвестиційно привабливих.
- Запаси від 0,11 до 1,31 млн т – середні за обсягом руди родовища, інвестиційно привабливі, деякі з яких на даний час розробляються.
- Запаси понад 1,31 млн т – крупні й унікальні родовища, всі розробляються.

Полохівське та Шевченківське родовища, відповідно до наведеного графіка, є середніми за запасами та інвестиційно привабливими. Інші європейські сподумен-петалітові родовища попадають у виділені нами класи дуже дрібних мало

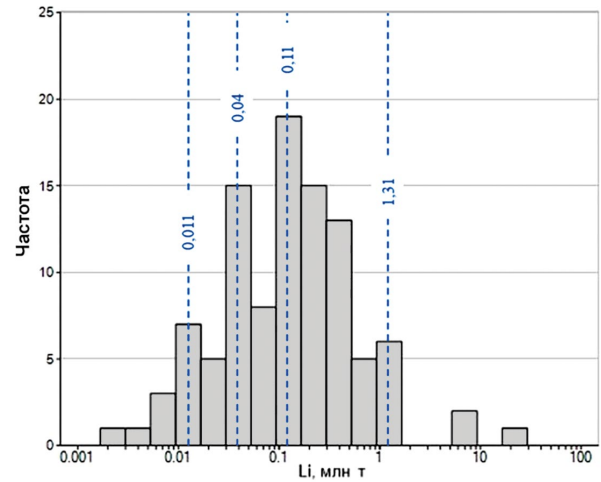


Рис. 2. Логнормальна гістограма розподілу запасів літію

перспективних і дрібних слабо привабливих. Тобто, ґрунтуючись тільки на цьому параметрі, перспективи освоєння літєвих родовищ України є високими.

Економічна значущість мінерального складу руди

Через свою реакційну здатність і надзвичайну літофільність літій не трапляється в природі у самородному стані. Натомість, він входить до кристалічної структури понад 145 мінералів і є присутнім ще в майже 100, де заміщує одновалентні катіони, але не є невід'ємною частиною кристалічної структури цих мінералів. Серед них є тільки декілька, що можуть бути економічно використані (табл. 3). І лише чотири з наведених, а саме петаліт, сподумен, лепідоліт і хлорид у розсолах, в даний час видобуваються в промислових масштабах, тоді як економічна значущість інших форм або незначна, або наразі оцінюється. Вміст літію у вказаних мінералах зазвичай менше теоретичного через природне заміщення іона літію іншими елементами.

Для родовищ літію інформація про запаси руди із вмістом Li_2O без вказання мінерально-технологічних типів руди мало про що говорить. Розуміння мінеральної форми знаходження літію та асоційованих з ним супутніх мінералів у рудних тілах має фундаментальне значення з точки зору передбачення варіантів збагачування та вилучення літію.

Вплив мінеральних форм літію на вибір схеми переробки широко висвітлений в літературі [8, 11, 12, 24]. Для родовищ України важливими є сподумен, петаліт і, меншою мірою, лепідоліт. Частка інших цінних і, навпаки, шкідливих мінера-

Таблиця 3. Джерела видобування літію

Мінерал літію / сполука	Хімічна формула	Природний вміст Li, %	Економічна значущість в якості сировини літію
Озерні розсоли	LiCl	0,04–1,15	Велика
Сподумен	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	3,7–7,2	>>
Петаліт	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	1,6–4,2	>>
Лепідоліт	$\text{KLi}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	1,4–3,6	Низька; тільки в асоціації з петалітом і сподуменом
Цинвальдит	$\text{K}(\text{Li}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{F}, \text{OH})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$	1,2–1,3	Низька; потенційне джерело Rb
Гекторит	$\text{Na}_{0,3}(\text{Mg}, \text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,4–0,5	Не визначена
Амблігоніт	$\text{LiAl}[\text{PO}_4][\text{F}, \text{OH}]$	3,4–4,7	Незначна
Евкриптит	LiAlSiO_4	2,1–5,5	>>
Ядарит	$\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$	До 7,3	Не визначена, сировина бору
Геотермальні розсоли	Невідома	0,01–0,04	Видобування припинено з 2015 р.
Нафтові розсоли	LiBr	0,01–0,05	Пілотний проект з 2011 р.

лів (наприклад, танталіт-колумбіту, каситериту, слюди, фосфатів літію та ін.) є мінливою, але присутність і вміст цих мінералів залежать від умов походження та віку утворення, що проаналізовано у наступному розділі.

Літєві слюди, зокрема лепідоліт, присутні в асоціації зі сподуменом на Шевченківському сподуменовому родовищі. Співвідношення вказаних мінералів є важливим для вибору схеми збагачування, оскільки для подальшого ефективного виробництва карбонату літію бажано, щоб концентрат був номінеральним. При цьому, незважаючи на вищу ціну, споживачі віддають перевагу сподумену [4]. Наявність слюди у сподуменовому концентраті призводить до фінансових штрафів, оскільки слюда ускладнює металургійний процес, особливо через проблеми, що виникають на початковій стадії прожарювання і переводу сподумену в його тетрагональну β-модифікацію [11]. Літій, що міститься в слюді, взагалі не вилучається і тому не береться до уваги при розрахунку вихідного вмісту сирової руди, що постачається на збагачувальну фабрику.

Лепідолітовий концентрат має дещо інші ускладнення проблеми. Такий фізичний параметр, як м'якість, відіграє негативну роль і призводить до утворення в процесі подрібнення шламів слизу. Кількість слизу знаходиться в прямій залежності від розміру пластинок слюди. Взагалі, утворення слизу призводить до втрат літію в процесі дешламування і підготовки промпродукту до флотації. Як наслідок, літєва слюда помітно концентрується в шламі (понад 25 % літію в перерахунку на метал) на протизагу живленню флотації. Звичайні випадки, коли хвости флотації містять більше літію, ніж концентрат. Зважаючи на зазначені фактори, вилучення літію із лепідолітового концентрату наднизьке (нижче 80 %). При цьому чистота карбонату літію нижче 90 % порівняно із петалітовими та сподуменовими концентратами – 99,21 та 99,75 %, відповідно.

На Полохівському петалітовому родовищі встановлені фосфати літію, зокрема трифіліт та, менше, амблгоніт-монтебразит. На відміну від синтетичного трифіліту, який розглядається в якості перспективної сировини для застосування в акумуляторних батареях, природний трифіліт є небажаним у петалітовій руді. Вміст цього мінералу невеликий, що робить його вилучення в окремий комерційний продукт проблематичним. Крім того, він є носієм шкідливих домішок заліза, марганцю і фосфору.

Ще одним потенційним ускладненням є те, що вторинні метасоматичні зміни або вивітрювання похідних сподумену та петаліту, таких як евкриптит, літєвий смектит (монтморилоніт) та літійвмісний каолінит, додають до загального вмісту Li_2O , але в той же час можуть не бути вилучені в окремий

продукт під час збагачування. І взагалі, зона кори вивітрювання по пегматитах може виявитися економічно непридатною для використання [2].

Це означає, що економічні наслідки, пов'язані з мінеральною формою літію, значні. Для уникнення негативного впливу на виробництво на стадії геологічного вивчення хімічні аналізи мають супроводжуватися, як мінімум, петрографічним описом та рентгеноструктурним аналізом, маючи на меті визначення мінералогічних різновидів і технологічних сортів або доменів. Сучасною тенденцією є автоматизація процесу геологічної документації із залученням наукоємних методів, зокрема електронно-зондового рентгеноспектрального мікроаналізу, растрового електронного мікроскопа у комбінації з ІСР для визначення фаз слюд, час-пролітної мас-спектрометрії [27] для визначення шкідливих домішок та ін.

Комерційні вимоги якості для концентратів

Концентрати для скляної та керамічної промисловості відносять до технічного сорту, а для виробництва акумуляторних батарей – до хімічного сорту. Різновиди технічних сортів для керамічної промисловості називають стандартними сортами. Концентрати преміумкласу хімічного сорту часто називають акумуляторним сортом. За межу відокремлення хімічного сорту від технічного прийнята якість концентратів, що отримані при збагачуванні методами, заснованими на використанні об'ємної ваги матеріалу (гравітаційні, у важких рідинах). Для сподумену це 6 % Li_2O , для петаліту – 4,0 % Li_2O і для лепідоліту – 1,5 % Li_2O [15]. Порівняння українських концентратів із світовими брендами наведено в табл. 4, 5.

Виробництво більш якісних по літію концентратів не завжди виправдано, тому що збільшення витрат на додаткове очищення підпорядковується експоненціальній залежності. Це тому, що для підвищення якості концентрату зазвичай використовується флотація. Тобто, кінцевий концентрат буде складатися із суміші грубо- і дрібнозернистих частинок, а сучасні конверсійні заводи запроєктовані на використання або гравітаційних, або флотаційних концентратів. За перевищення контрактованих лімітів розподілу розміру частинок у концентраті постачальник сплачує штраф. Для концентратів преміумкласу виставляються додаткові вимоги щодо домішок фосфору, титану, магнію і марганцю [1].

Взагалі, на ринку встановлені такі орієнтири щодо фракцій розподілу частинок [25]:

- грубозерниста технічна фракція, не більше 850 мк, для скляної та керамічної промисловості 2,0–4,8 % Li_2O ;
- крупнозерниста хімічна фракція, не більше 500 мк, для хімічної промисловості 6,0–6,5 % Li_2O ;

Таблиця 4. Сорти якості петалітових концентратів

Компонент	Сорти концентратів родовища Бікита (Зімбабве)			Сорт Полохівського родовища	
	Хімічні		Технічні	Хімічний	Технічний
	Акумуляторний	Стандартний	Для скла	Акумуляторний	Стандартний
Li_2O , %	4,50	4,20	2,10	4,40	4,10
Fe_2O_3 , %	0,08	0,03	0,05	0,08	0,05

Таблиця 5. Сорти якості сподуменових концентратів

Компонент	Хімічні сорти				Технічні сорти	
	Акумуляторний	Преміум	Стандартний		Технічні сорти	
	Talison SC7.5	Pilgangoora	Talison SC6.0	Kings Mountain	Mount Catlin	Шевченківське родовище
Li_2O , %	7,60	6,68	6,05	6,00	5,50	5,25
Fe_2O_3 , %	0,07	1,46	0,70	1,90	1,60	0,9

– дрібнозерниста хімічна фракція преміумкласу, не більше 125 мк, для хімічної промисловості 7,3–7,5% Li_2O ;

– проміжна хімічна фракція, 45–500 мк, без специфікації вмісту Li_2O .

Загальною рисою петалітових і сподуменових концентратів українських родовищ є те, що вони відносяться до проміжної хімічної і технічної фракції, з огляду на дрібний розмір мінералів літію в корінному заляганні (Полохівське родовище) або на їх тісні зростки з кварцом (Шевченківське родовище) і необхідність застосування флотаційного збагачування. У вказаному сенсі основні технологічні ускладнення проблеми українських концентратів літію такі:

– Виробництво сподуменового флотаційного концентрату преміумкласу (7,3 % Li_2O) із руди Шевченківського родовища можливе, але вимагає декілька стадій очищення для розкриття дрібних зростків сподумену і кварцу, що призводить до втрат літію.

– Петаліт Полохівського родовища добре піддається флотації, однак у присутності калій-натрієвого польового шпату, альбіту та слюди селективність флотації помітно знижується.

Економічна значущість петаліту і сподумену

Оскільки в міжнародній торгівлі літієм домінує карбонат літію, доцільно порівняти петаліт та сподумен з точки зору вартості отримання одиниці цього продукту. Як приклад, розглянемо стандартний петалітовий концентрат, що вміщує 4,2 % Li_2O , припускаючи втрати при збагачуванні (5 %), транспортуванні (2 %) та приймаючи вміст вологи в концентраті у 7,5 %. Процедура розрахунку така:

а) 4,2 % Li_2O означає вміст петаліту в концентраті 85,7 %;

б) така кількість петаліту еквівалентна ($0,857 \times 0,121 = 0,104$ т) карбонату, або 1 т карбонату літію дорівнює $1 : 0,104 = 9,642$ т петалітового концентрату;

в) враховуючи втрати при вилученні ($(9,642 + 9,642) \times 0,05 = 10,124$ т), транспортуванні ($(10,124 + 10,124) \times 0,02 = 10,326$ т) та поправку на вологість концентрату, отримуємо ($(10,326 + 10,326) \times 0,075 = 11,101$ т).

Таким чином, для одержання 1 т карбонату літію чистоти 99,2 % необхідно переробити 11,1 т петалітового концентрату із вмістом 4,2 % Li_2O . Або, в якості емпіричного правила для приблизних розрахунків, 1 т стандартного петалітового концентрату еквівалентна 0,09 т карбонату літію. Застосовуючи таку ж саму процедуру для преміального сподуменового концентрату (7 % Li_2O), отримуємо 6,6 т сподуменового концентрату на 1 т карбонату літію. Переводячи одержані результати в грошові терміни, за умов однакового способу видобутку і збагачування, отримуємо, що виробничі витрати

на 1 т карбонату літію із петалітового концентрату в 1,7 раза більші, ніж із сподуменового.

Але цінність петаліту пов'язана з тим, що він майже не містить такої шкідливої домішки, як залізо, і має найвище співвідношення $\text{Li}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3$, за будь-який інший мінерал – 0,27, у сподумені – 0,26, в амблгоніті – 0,23 та в лепідоліті – 0,19 [23]. З точки зору отримання карбонату літію з петаліту операційні витрати найнижчі. Така властивість робить петаліт привабливим для використання у фосфорних акумуляторних батареях та станціях (катоди LFP та LMFP) (табл. 6) [16]. Для довідки, українські сподуменові та комплексні петаліт-сподуменові концентрати підходять для виготовлення акумуляторних батарей, що застосовуються в дронах (катоди LMFP).

Так як вибір батареї це завжди компроміс між щільністю енергії, потужністю, безпекою і вартістю, необхідно знати загальні тенденції, що домінують на ринку. Зроблений 10 років тому прогноз [19] підтверджується: кобальтові, марганцеві, нікелеві та фосфорні батареї будуть продовжувати конкурувати на ринку електромобілів ще якнайменше 10 років [16]. Пошук нових ефективних і безпечних хімічних сполук, які містять літій, інтенсивно розвивається.

Висновки

Немає сумнівів, що в Україні буде створена своя гірничодобувна і переробна промисловість літієвої сировини. Але перед нею вже стоїть перший виклик щодо конкурентоспроможності в умовах стрімкого зростання попиту та забезпечення пропозиції стабільної якості. Звичайно, що створення нових гірничодобувних і переробних підприємств вимагає значних ресурсів і не буде швидким. Вирішальне значення для їх економіки буде мати технологія вилучення мінералів літію, а першим кроком є просторове визначення металургійних типів і технологічних (мінералогічних, текстурно-структурних) доменів руд.

Другий виклик, на який потрібно буде відповісти вже на стадії складання інвестиційного ТЕО, полягає у визначенні кінцевого комерційного продукту, тобто типу підприємства: гірничо-збагачувальний комплекс з виробництва концентрату чи інтеграція такого комплексу із хімічним заводом для виробництва карбонату або гідроксиду літію. Одним із критеріїв для прийняття рішення є розмір запасів. Якщо виробництво концентрату має бути забезпеченим щонайменше на 10 років роботи, то для інтегрованого підприємства необхідно понад 20.

Прийняття такого рішення є важливим компромісом між прибутком, ризиком і витратами. Якщо прийняти рішення не

Таблиця 6. Типи літій-іонних батарей (модифіковано за [18])

Абревіатура катоду	Формула	Гравіметрична енергія, Вт/кг	Ціна, дол./кг	Тип сировини
NCA	LiNiCoAlO_2	350	–	Гідроксид літію з розсолів
LMO	LiMn_2O_4	480	12–15	Карбонат літію з розсолів і сподумену
LFP	LiFePO_4	500	15–22	Карбонат літію з петаліту
LMFP	$\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$	570	15–22	Карбонат літію з петаліту і сподумену
LCO	LiCoO_2	570	30–70	Карбонат літію з розсолів
LNMC	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$	570–690	20–50	Те ж саме
LNMO	$\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{3/2}\text{O}_4$	630	15–25	>>
LCP	LiCoPO_4	720	20–50	>>
LLNMC	$x\text{Li}_2\text{MnO}_3(1-x)\text{LiMnO}_2$	960	20–40	>>
LTO	Li_2TiO_3	1005	–	>>

інтегрувати, то в порівнянні з хімічним виробництвом капітальні та операційні витрати менші, менший ризик, але ціна продаж теж нижча. І тут немає однозначної відповіді. Але якщо вибрати варіант з інтегрованим хімічним підприємством, то екологічні, соціальні та енергетичні критерії стають важливими. Крім того, для інтегрованого підприємства жорсткі ліміти щодо шкідливих домішок здебільшого втрачають свій негативний вплив.

Насамкінець третій виклик – це утилізація відходів виробництва та можливість економічного вилучення супутніх корисних копалин. На інтегрованому літєвому підприємстві буде вироблятися і накопичуватися величезна кількість відходів, що потребує додаткових витрат на їх утилізацію.

Подяки. Автори дякують заступнику директора за наукової роботи Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення НАН України ім. М. П. Семененка, члену-кореспонденту НАН України Л. М. Степанюку та головному геологу ДП УГК, кандидату геологічних наук В. П. Безвинному за цінні поради і допомогу в підготовці цієї статті.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Chagnes, A., Swiatowska, J. (Eds.). Lithium process chemistry. Resources, extraction, batteries, and recycling. – Elsevier, 2015. – 300 p.
2. Charoy, B., Noronha, F., Lima, A. Spodumene-petalite-eucryptite: mutual relationships and pattern of alteration in Li-rich aplite-pegmatite dykes from Northern Portugal // The Canadian Mineralogist. – 2001. – No. 39. – P. 729-746.
3. Chesnutt, J., Qafoku, N., Kreuzer, R. Lithium occurrence and concentration grade around the nation. Resources, extraction technologies and economics. – US Department of Energy, 2023. – 56 p.
4. Gibson, C., Aghamirian, M., Grammatikopoulos, T., Smith, D., L., Bottomer, L. The recovery and concentration of spodumene using dense media separation // Minerals. – 2021. – 11 (6) p. <https://doi.org/10.3390/min11060649>
5. Global lithium (Li) mines, deposits and occurrences map. British Geological Survey. – 2021. – 1 p. <https://lithiumfuture.org/map.html>
6. Gunn, G. (Ed.). Critical Metals Handbook. British Geological Survey. – 2014. – 451 p.
7. Goodenough, K., Dedy, E., Shaw, R. Lithium resources and their potential to support battery supply chains, in Africa. British Geological Survey. – 2021. – 21 p.
8. Ibarra-Gutierrez, S., Bouchard, J., Laflamme, M., Fytas, K. Assessing the potential of Quebec lithium industry: Mineral Reserves, lithium-ion batteries production and greenhouse gas emissions // Resources Policy. – 2021. – Vol. 74. – P. 1-7. U.S.
9. Jaskula, B. W. Lithium // U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. – 2023. – 2 p.
10. Jinkang, L., Tianren, Z., Xifang, L., Denhong, W., Xin, D. The metallogenic regularities of lithium deposits in China // Acta Geologica Sinica (English Edition). – 2015. – Vol. 89, No. 2. – P. 652-670.
11. Karrech, A., Azadi, M.R., Elchlakani, M., Shahin, M.A., Seibi, A.C. A review on methods for liberating lithium from pegmatites // Minerals Engineering. – 2020. – Iss. 145. – 10 p. [https://doi.org/10.1016/j/mineng.2019.10685](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.10685)
12. Kashif Nazir, M., Dyer, L., Tadesse, B., Albijanic, B., Kashif, N. Lithium deportment by size of a calcined spodumene ore. Scientific reports. – 2022. – 9 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22808-7>
13. Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M., P., Wallington, T. J. Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits // Ore Geology Reviews. – 2012. – No. 48. – P. 55-69.
14. Lithium commodity profile. British Geological Survey. 2016. www.mineralsUK.com
15. Martins, L. P. Mineral resources of Portugal. Direcção General de Energia e Geologia. – 2012. – 71 p.
16. Miao, Yu., Hunan, P., Jouanne, A., Yokochi, A. Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advances // Energies. – 2019. – P. 1-20.
17. Natural resources: mining and processing of critical materials // Ukraine Recovery Conference, June 21-22 2023. – London, UK. – 59 p.

18. Nazri, Gh.-A., Pistoia, G. (Eds.). Lithium batteries. Science and technology. – 2009. – Springer. – 708 p.
19. Orangi, S., Manjong, N., Clos, D. P., Usai, L., Burheim, O. S., Stromman, A. H. Historical and prospective lithium-ion battery cost trajectories from a bottom-up production modeling perspective // Journal of Energy Storage. – 2024. – No. 76. – P. 1-14.
20. Pitron, G. The rare metals war. Scribe. – 2020. – 225 p.
21. Reuters. 8, June 2023. <https://www.reuters.com/markets/commodities/namibia-bans-export-unprocessed-critical-minerals-2023-06-08/>
22. Siljkovic, B., Denic, N., Rakic, G. Environmental and economic assessment of the effect of critical mineral of green revolution – lithium // Mining and Metallurgy Engineering Bor. – 2017. – No. 1-2. – P. 103-114.
23. Simmons, Wm. B., Webber, K. L. Pegmatite genesis: state of the art // European Journal of Mineralogy. – 2008. – No. 20. – P. 421-438.
24. Sitando, O., Crouse, P. L. Processing of a Zimbabwean petalite to obtain lithium carbonate // International Journal of Mineral Processing. – 2012. – No. 102-103. – P. 45-50.
25. Schmidt, M. Lithium potential in Namibia – evaluation of economic suitability. BGR Report. – 2020. – 152 p.
26. Sykes, J., Schdde, R. A global overview of the geology and economics of lithium production. AusIMM Lithium Conference presentation. – 2019. – 66 p.
27. Timich, M., Contessotto, R., Ulsen, C. Process mineralogy of Li-enriched pegmatite combining laboratory mineral separations and SEM-based automated image analysis // Minerals. – 2023. Vol. 13, No. 343. – 19 p. <https://doi.org/10.3390/min13030343>

Рукопис отримано 9.04.2024.





- Розвідка родовищ корисних копалин
- ГЕОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПАСІВ КОРИСНИХ КОПАЛИН
- Консультування надрокористувачів з геологічних аспектів надрокористування
- Підготовка документів та матеріалів для отримання спецдозволів на користування надрами

ГЕО-КРАТОН – ГЕОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Адреса: вул. Братства тарасівців, будинок 3, офіс 327, 02121, м. Київ, Київська область, Україна
Телефон +38 (050) 352-2477