

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.01.003>
УДК 549.0

В.І. Павлишин, д-р геол.-мін. наук, проф., акад. АН ВШ України, зав. відділу
E-mail: V.I.Pavlyshyn@gmail.com; ResearcherID: D-6558-2019

Д.А. Ярощук, аспірант
E-mail: mitya.yaroshchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0190-8611>

І.М. Луньова, канд. геол. наук, співроб.
E-mail: gerasimetsirina@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4670-0216>

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

ЛІТІЙ У НАДРАХ УКРАЇНИ

Частина 9. Генезис літієносних об'єктів: геокристалохімія рідкіснометалевих пегматитів Українського щита

Уперше зроблено спробу охарактеризувати пегматити геокристалохімічно, тобто з позиції полімеризації мінеральної хімії, з'ясувати склад, будову та властивості мінералоутворювальних середовищ. Загалом, у рамках цієї теорії в силікатах провідною є реакція на кшталт $2[\text{SiO}_4] \rightarrow [\text{Si}_2\text{O}_7] + \text{O}$, яка супроводжується виділенням вільного кисню, що насправді ніяким чином не фіксується. На думку М.В. Белова, підтверджену нашими дослідженнями, тетраedr $[\text{SiO}_4]$ є лише статичною одиницею, а динамічною одиницею у пегматитовому розплаві, у вигляді якої силіцій переходить ("перестрибує"), за образним висловом М.В. Белова, з однієї "гратки" в іншу, з рідкої фази в кристалічну, є незаряджена молекула SiO_2 . Ця особливість пегматитового розплаву, ускладнена мінералізаторами (легкими компонентами), покладена нами в основу геокристалохімії рідкіснометалевих, частково камерних пегматитів Українського щита. У пегматитовому розплаві йони літію виконують роль деполімеризатора, тобто "руйнівника" каркасних структур. Передбачається орієнтовно така схема утворення сподумену: молекули SiO_2 приєднуються до О-кінцівок раніше утворених тетраедрів $[\text{SiO}_4]^{4-}$ і створюють ланцюжкове угруповання $[\text{Si}_2\text{O}_6]_\infty^{4-}$. Далі це кисле угруповання "притягує" до себе лужний іон Li, який тягне за собою Al і формує структуру сподумену $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$.

Ключові слова: пегматит, геокристалохімія, силікат, алюмосилікат, розплав, силіфікація, диференціація магми, сподумен, петаліт.

Вступ. На розрізі земної кори під камерними пегматитами і рідкіснометалевими гранітами — репрезентантами гіпабісальних умов мінералоутворення — орієнтовно в інтервалі 3,5—7 км локалізовані глибинні рідкіснометалеві пегматити, які зазвичай тектонічно приурочені до системи вузьких і видовжених шовних прогинів — геосинкліналь-

них трогів і грабен-синкліноріїв докембрійських платформ (Ginzburg, Timofeyev, Feldman, 1979). Мінералогічно рідкіснометалеві пегматити відрізняються від камерних пегматитів і рідкіснометалевих гранітів появою в них структурно щільніших мінералів-носіїв літію, передусім сподумену та фосфатів літію.

Цитування: Павлишин В.І., Ярощук Д.А., Луньова І.М. Літій у надрах України. Частина 9. Генезис літієносних об'єктів: геокристалохімія рідкіснометалевих пегматитів Українського щита. *Мінерал. журн.* 2025. 47, № 1. С. 03—12. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.01.003>

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2025. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Рідкіснометалеві пегматити України цілком зосереджені на території Українського щита (УЩ). У фанерозі вони невідомі. Спочатку такі пегматити були виявлені в Криворізько-Кременчуцькій зоні (Kushev, 1960), де вони локалізовані на двох ділянках — Жовторіченській та Комендантівській (Gursky et al., 2006); пізніше відкрито рідкіснометалеві родовища Крута Балка та Шевченківське у Приазов'ї (Rozanov and Lavrinenko, 1979; Kichurchak, 1988; Isakov and Bobrov, 2000). У 1989—1990 рр. в Інгільському мегаблоці виявлений новий Шполянсько-Ташлицький рудний район поширення рідкіснометалевих пегматитів (Nechaev et al., 1991; Barkarzhiev et al., 2000; Syomka et al., 2022).

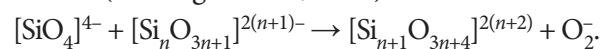
Рідкіснометалеві пегматити, які ще називають пегматитами середніх глибин, зазвичай розміщені поза материнськими гранітними масивами, тектонічно пов'язані з глибинними розломами та метаморфічними процесами. За даними Ю.М. Соколова (Sokolov, 1981), вони приурочені до порід кордієрит-антофілітової субфації амфіболітової фації метаморфізму та містять підвищені концентрації Li, Rb, Cs, Ta, Be, Sn, а також ювелірну сировину — кунцит, берил, кольорові та поліхромні турмаліни. Літій рідкіснометалевих пегматитів України здебільшого сконцентрований в одному або двох рудних мінералах — сподумені та петаліті. Звідси впливає доцільність поділу пегматитів на три типи: сподуменові (родовище Крута Балка, Жовторіченський рудопрояв), сподумен-петалітові (Шевченківське родовище), петаліт-сподуменові (пегматити Інгільського мегаблока, серед яких Полохівське родовище є істотно петалітовим).

Мета статті — висвітлити загальну геокристалогімічну концепцію й напрацювати геокристалогімічну гіпотезу формування рідкіснометалевих, частково камерних пегматитів УЩ.

Загальна геокристалогімія та геокристалогімія пегматитів УЩ. Геокристалогімія — зрідка вживаний термін у мінералогічній літературі (Pavlyshyn, Matkovskiy, Dovgiy, 2021), який запровадив у науку М.В. Белов (Belov et al., 1970; Belov, 1976) з метою поглиблення та розширення на принципово нових засадах, насамперед геокристалогімії основного про-

цесу кристалізації магм. Микола Васильович не навів компактного визначення (дефініції) геокристалогімії, але нечувано збагатив теоретично обґрунтованими прикладами практично всі розділи сучасної мінералогії, посиливши тим самим її фундаментальний статус.

Тепер трошки історії. У силікатних розплавах основною структурною одиницею є кремнекисневий тетраедр $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Дослідження електропровідності силікатних розплавів показали, що вони являють собою йонні рідини (Yesin and Geld, 1966). За даними літературного аналізу (Trufanova and Glyuk, 1986), склад силікатних розплавів істотно впливає на будову та розміри їхніх полімерних угруповань. Зокрема з'ясовано, що кремнекисневі угруповання з підвищенням у них вмісту металів зменшують свої розміри впритул до ізолюваних мономерних угруповань $[\text{SiO}_4]^{4-}$. У подальшому модель полімерної будови силікатних розплавів розвивалася теоретично та експериментально. Зроблено навіть перші спроби створити кількісну модель полімерної будови силікатних розплавів (Anfilogov et al., 1986).



Ось тут прихована концептуальна інтрига, яку обґрунтував і розтлумачив М.В. Белов як помилкове судження (Belov et al., 1970; Belov, 1976). Далі, в руслі ідей Миколи Васильовича та наших даних, висвітлюватимемо нову геокристалогімічну концепцію, зокрема геокристалогімію рідкіснометалевих, частково камерних пегматитів УЩ.

Перед викладом матеріалу по суті наводимо наше розуміння поняття "геокристалогімія" у вигляді стислої дефініції: геокристалогімія — розділ генетичної мінералогії й кристалогімії, в рамках якого з'ясовують склад, будову та властивості мінералоутворювальних середовищ.

Повертаємось до зазначених вище суджень хіміків і кристалогіміків, в яких не ставиться питання про причини процесу, котрий на папері виглядає як відновний і супроводжується виділенням великої кількості кисню:

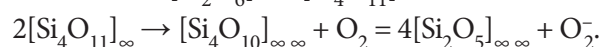
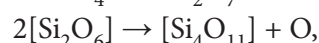
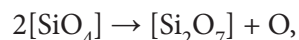


Рис. 1. Утворення ортогрупи $[\text{SiO}_4]^{4-}$ під час посадки нейтральної молекули SiO_2 на площадку з Mg-октаєдрів. За М.В. Беловим (Belov et al., 1970)

Fig. 1. Formation of the orthogroup $[\text{SiO}_4]^{4-}$ during the attachment of a neutral SiO_2 molecule on a place of Mg-octahedra. According to M.V. Belov (Belov et al., 1970)

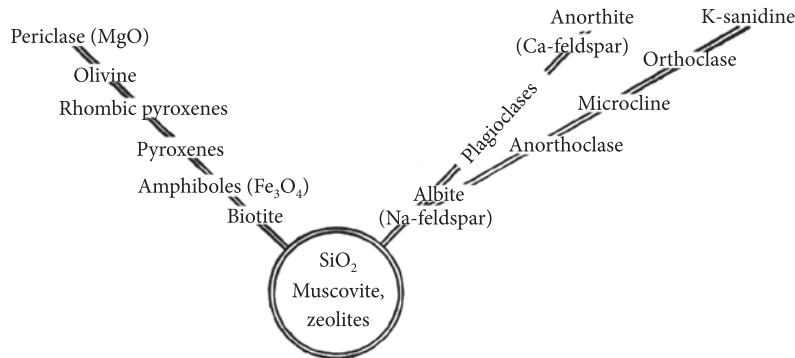
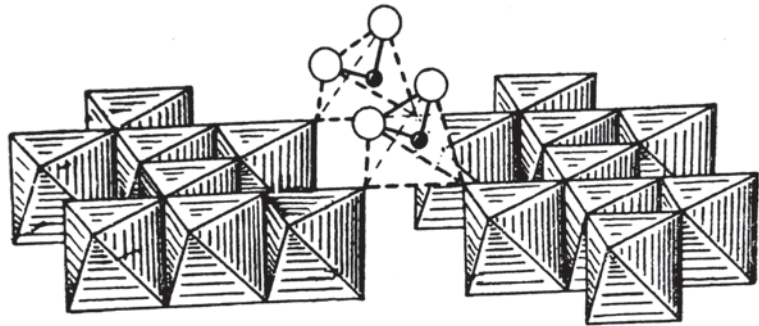


Рис. 2. Схема кристалізації головних мінералів з магматичного розплаву. За Н. Боуеном — М.В. Беловим (Belov et al., 1970)

Fig. 2. Scheme of crystallization of main minerals from magmatic melt. According to N. Bowen — M.V. Belov (Belov et al., 1970)

Причина згаданих вище непорозумінь захована в уявленнях про те, що тетраєдр $[\text{SiO}_4]^{4-}$ вільно переміщується з однієї хімічної сполуки до іншої, попри великий розмір і великий заряд. М.В. Белов вкотре наголошував, що в усіх процесах, пов'язаних із силікатами, основною діючою ("динамічною"), тобто рухомою, одиницею залишається молекула SiO_2 . Таким чином, кремнезем переходить з однієї фази в іншу. Тетраєдр $[\text{SiO}_4]$ залишається статичним. Динамічна одиниця, у вигляді якої кремнезем "перестрибує" з однієї ґратки до іншої, з рідкої фази до кристалічної, зокрема, до людського організму (силікоз) — це незаряджена молекула SiO_2 кутової конфігурації ($\angle \text{O—Si—O} = 109^\circ$), яка, на думку М.В. Белова, ставить площину свого трикутника під прямим кутом до найближчого вектора ($\text{O—O} = 2,7 \text{ \AA}$) з подальшим розкриттям ще двох щупальців Si (двох потенціальних зв'язків — sp^3 -гібридизація) для утворення "на місці" статичної одиниці $[\text{SiO}_4]^{4-}$ (рис. 1).

Знаменита гілка (ряд) Боуена потужно ожила в геохімічній концепції М.В. Белова, який дав емпірично виявленому порядку кристалізації мінералів кристалохімічне та геоенергетичне тлумачення (рис. 2).

Оксиди кальцію та магнію, що знаходяться в розплаві, мають конфігурацію октаєдричних груп $[\text{CaO}_6]$ і $[\text{MgO}_6]$ і є першими структурними одиницями майбутніх твердих фаз, оскільки температури плавлення CaO і MgO дуже високі (2570°C та 2800°C відповідно). У ранні стадії магматизму тетраєдричні групи $[\text{SiO}_4]$ та $[\text{AlO}_4]$ не мають твердо фіксованого положення. Зі зниженням температури у тетраєдричних груп $[\text{SiO}_4]$ чітко проявляються кислотні властивості, внаслідок чого вони наближаються до октаєдричних угруповань $[\text{MgO}_6]$. Цьому сприяє приблизно однаковий розмір ребер октаєдрів $[\text{MgO}_6]$ і тетраєдрів $[\text{SiO}_4]$. Так виникає єдина найщільніша упаковка кисневих атомів майбутнього кристала олівіну або ромбічного піроксену.

Для атомів Si і Al — "сильних" катіонів з великим зарядом і малим радіусом — природно бути подалі один від одного, але цьому заважають спільні атоми кисню. Внаслідок цього тримірна сітка стає максимально розрідженою з малою густиною ($<3 \text{ г/см}^3$) і, можливо, чималими кавернами. У них "добре себе почувають" великі катіони (K, Na, Ca) й недостатньо "затишно" — середні (Mg, Fe), які тому намагаються покинути сітку магми та утворити власні темноколірні та важкі

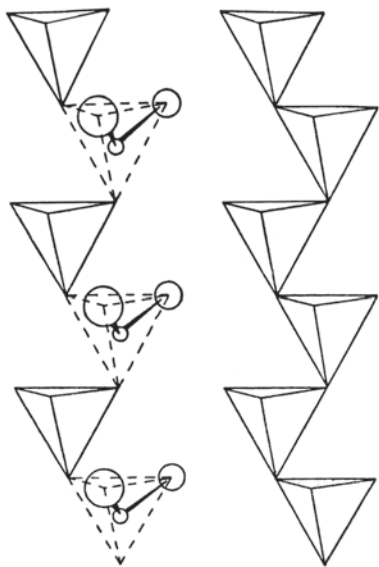


Рис. 3. Металанцюжок $[\text{Si}_2\text{O}_6]$ — продукт силіфікації дискретних тетрадрів SiO_4 нейтральними молекулами SiO_2 . За М.В. Беловим (Belov et al., 1970)

Fig. 3. The $[\text{Si}_2\text{O}_6]$ metachain is a product of the silicification of discrete SiO_4 tetrahedra by neutral SiO_2 molecules. According to M.V. Belov (Belov et al., 1970)

фази (густина $>3 \text{ г/см}^3$). Отже, першими виділяться з магми повинні кристали периклазу MgO (температура плавлення 2800°C), "розбавлені" щораз більшими порціями ізоморфного FeO . Відмінність в основності та кислотності двох фаз — причина силіфікації, тобто викидання з тетраедричної в'язі окремих "молекул" SiO_2 — і периклаз швидко перетворюється на форстерит $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$, а разом із Fe — в олівін $(\text{Mg, Fe})_2[\text{SiO}_4]$.

Зі зниженням температури темноколірна фаза поглинає все більшу кількість SiO_2 , олівін змінюється піроксенами з ланцюжками $[\text{Si}_2\text{O}_6]_\infty$, пізніше біотитами з сітками $[\text{Si}_2\text{O}_5]_\infty$. Цей процес характеризується двома ступенями силіфікації:

1. $\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2 = [\text{Si}_2\text{O}_6]_\infty$.
2. $[\text{Si}_2\text{O}_5]_\infty + 2\text{SiO}_2 = [\text{Si}_4\text{O}_{10}]_\infty$.

Силіфікація, що прогресує, тобто поглинання Mg (Fe) октаедрами щораз більшої кількості кремнезему, характерна риса темноколірної гілки Боуена. На правій гілці відбувається звільнення від незручних атомів Mg (Fe) тетраедричної маси. Великі двозарядні катіони Ca стабілізують "на місці" окремі ділянки тетраедричної в'язі, передусім "найслабкіші" — ті, де високий вміст Al ; у

такий спосіб народжуються перші кристали анортиту $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$. Зі зниженням температури та виснаженням запасів Ca стабілізаційна роль у тетраедричній в'язі переходить до Na — ростуть плагіоклази зі зменшеним вмістом Ca впритул до натрієвого плагіоклазу — альбіту $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$. У кінці цього процесу диференціації починають виділятися калієві польові шпати — санідини та мікрокліни.

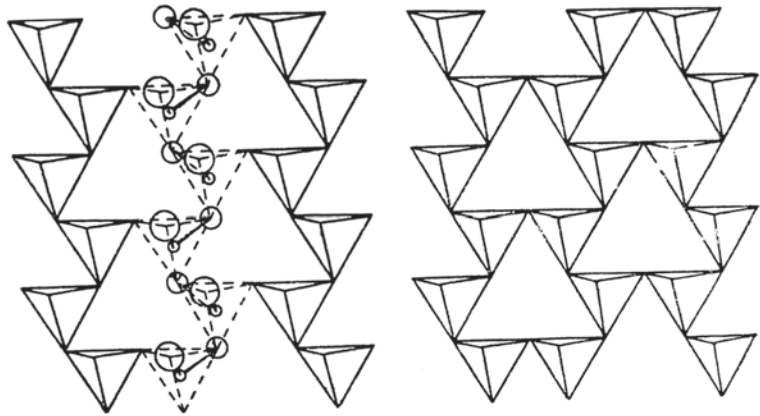
Важко відривати від ажурної в'язі що-небудь інше, крім дискретних нейтральних молекул SiO_2 , які силіфікують першовиділення, тобто куткові молекули SiO_2 приєднуються до O -кінцівок сусідніх раніше утворених Si -тетраедрів (рис. 3) і створюють ланцюжки без реакції відновлення: $[\text{SiO}_4]^{4-} + \text{SiO}_2 = [\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$. Ця реакція силіфікації чисто геометрично зручна саме для дискретних куткових молекул SiO_2 . На рис. 4. показано як вони влаштовуються поміж паралельними металанцюжками. Кальцій входить до алюмосилікатного каркасу не один. Він тягне за собою свої аналоги — Na , Sr , K , Rb , Ba , TR (вони мають близькі йонні радіуси). До структури алюмосилікатів можуть також входити ще три елементи — Mo , W , Be . Алюмосилікатний каркас не є чимось стабільним, вічним. Тетраедри $[\text{SiO}_4]$ та $[\text{AlO}_4]$ можуть розсуватися, утворюючи великі порожнини. Останні достатньо великі, щоб у них розмістити Cl , S , CO_2 , SO_4 — так виникають силікати з додатковими аніонами, насамперед фельдшпатоїди.

Зовсім інший випадок, коли в магмі переважає магній, в якого багато близьких геохімічних аналогів (Ni , Zn , V , Cu , Ti , Cr та ін.). Майже всі вони хромофори. Тому мінерали, що кристалізуються, є різнобарвними (орто-силікати, піроксени, амфіболи, слюди).

Характерною рисою кристалів правої та лівої гілок ряду Боуена, як зазначає М.В. Белов (Belov et al., 1970), є те, що для правої властива в'язь, тобто безперервний каркас з алюмосилікатних тетраедрів, тоді як у лівій наявні ізольовані кремнекисневі тетраедри. Останні можуть заміщуватися OH_4 (до 25 %). Це призводить до того, що частина тетраедрів виявляються порожніми, а це, в свою чергу, полегшує входження в октаедричні групи замість двовалентних

Рис. 4. Біотитова сітка — результат силіфікації нейтральними молекулами SiO_2 "основи" на паралельних піроксенових ланцюжках. За М.В. Беловим (Belov et al., 1970)

Fig. 4. Biotite mesh is the result of silicification of the "base" on parallel pyroxene chains by neutral SiO_2 molecules. According to M.V. Belov (Belov et al., 1970)



катионів (Mg, Fe) інших, більш високоенергетичних (Ti, Nb, Ta, Cr тощо). Ось чому руди цих металів часто супроводжують основні та ультраосновні типи магматичних порід.

Дещо складнішим під час кристалізації є приєднання безкінечних ланцюжків $[\text{SiO}_3]_\infty$, особливо безкінечних кременекисневих листів і каркасів до катіонних груп $[\text{MgO}_6]$ і $[\text{CaO}_6]$. Кристалізація таких "незручних" розплавів з оксидами, наприклад протяжних радикалів $[\text{SiO}_3]_\infty$, стає, однак, можливою за наявності в розплаві летких компонентів (мінералізаторів) — F, Cl, OH, — про значення яких М.В. Белов пише так: "Роль їх зводиться до того, що хоч сам по собі безкінечний ланцюг $\text{O—Si—O—Si—O—Si—O—Si—O}$ не може бути розірваний ні по атомах кремнію, ні по атомах кисню, оскільки при цьому відповідний кінцевий атом виявиться ненасиченим і нездатним до насичення одним якимсь іншим атомом, але розрив ланцюжка стає можливим, якщо на місце атома O поставити (маючи рівний об'єм) одновалентну групу OH або одновалентний іон F, які замикають відрізок ланцюжка. Чим більше в силікатній масі атомів фтору (або гідроксильних груп), тим коротші будуть уламки протяжних радикалів і тим легішою буде їхня взаємна кладка в єдину кристалічну ґратку" (переклад авт.) (Belov et al., 1970).

Гранітні пегматити, зокрема розвинені на території України, — це зазвичай продукти завершальної фази диференціації основного магматичного процесу. Пегматитовий розплав відрізняється від розплавів материнських гранітів підвищеним вмістом летких компонентів (мінералізаторів), рідкісних елемен-

тів ("творців" майбутніх родовищ) і пониженою в'язкістю, яка посилює його рухливість.

Генетично пегматити — гетерогенні утворення. Вони формуються внаслідок прояву магматичної, пневматолітової, гідротермальної й метасоматичної стадій мінералоутворення. Кожна стадія характеризується своєю специфікою геокристалохімічного процесу. Ми торкнемось лише геокристалохімії магматичної стадії мінералоутворення.

Перша і найголовніша особливість геокристалохімії камерних і рідкіснометалевих пегматитів України — істотна збідненість розплавів атомами Mg (Fe) (ліва гілка схеми Боуена) і Ca (права гілка), які "поглинули" олівіни, піроксени, амфіболи, біотити, Саплагіоклази. Зокрема, геокристалохімія підказує, що марно шукати у гранітних пегматитах олівіни та анортити.

Отже, гранітні пегматити отримали у спадок від гранітних розплавів нижчу, практично цілковито сіалічну, частину схеми Боуена, представлену специфічними пегматитовими розплавами, сформованими атомами O, Si, Al, Na, K, які вибудовують алюмокремнекисневий тетраедричний каркас (в'язь). Зі зниженням температури безкінечно протяжний каркас тетраедрів SiO_4 розривається на частини, завдяки участі в ньому тетраедрів AlO_4 , входженню йонів K і Na у порожнини каркасу, дії мінералізаторів (заміні кисню OH групами або флуором). Іншими словами, заміна в каркасі нейтральності на зарядність спричинила появу винятково сіалічних фаз — мікрокліну, альбіту та кварцу, до яких на перших етапах пегматитового процесу (перший етап заповнюють суто каркас-



Рис. 5. Схема утворення слюдяної сітки шляхом силіфікації піроксенового ланцюжка (Lazarenko et al., 1973)

Fig. 5. The scheme of mica mesh formation through the silicification of a pyroxene chain (Lazarenko et al., 1973)

ні структури, які адекватно віддзеркалюють домінуючу каркасну, суто тетраедричну, структуру пегматитового розплаву) приєднуються, залежно від термодинамічних умов, літєві мінерали — сподумен (високий тиск) і петаліт (понижений тиск).

Дев'яносто і більше відсотків пегматитових тіл і жил України заповнили три названі вище мінерали, які наділені однаковим каркасним мотивом, успадкованим від каркасної структури середовища мінералоутворення, хімічно споріднені, у польових шпатах наявні ізоморфізм Si і Al, упорядкування — розупорядкування цих атомів, усі три мінерали схильні до формування епітаксичних і двійникових зростків.

У камерних пегматитах Волині — гіпабісальних утвореннях — сподумен і петаліт відсутні. У середовищі мінералоутворення камерних пегматитів Li не спроможний був реалізувати себе у щільній сполуці протягом магматичної стадії пегматитоутворення. Літій потужно себе реалізував у вигляді літій-залізистих слюд, але вже в післямагматичну стадію, коли кардинально змінилась структура середовища мінералоутворення (див. нижче), виникли умови для зародження і росту рихлих шаруватих структур.

Дещо інша геокристалохімічна ситуація у рідкіснометалевих пегматитах УЩ. Насамперед треба згадати, що коли працював концентраційний чинник, то Li в розплаві рідкіснометалевих пегматитів виконував роль деполімеризатора, тобто "руйнівника" каркасних структур пегматитового розплаву.

За даними експериментів (Trufanova and Glyuk, 1986), у системі з LiOH насамперед зникають польові шпати — замість них ростуть сподумен і петаліт. Іон Li через свої відносно малі розміри не може замінити іони Na і K у структурі польового шпату без її відповідної перебудови. Виходячи із загальних геокристалохімічних міркувань можна передбачити таку орієнтовну схему утворення сподумену:

1) молекули SiO_2 приєднуються до О-кінцівок раніше утворених тетраедрів і створюють ланцюжкове угруповання: $[\text{SiO}_4]^{4-} + \text{SiO}_2 \rightarrow [\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}_\infty$;

2) це кисле угруповання "притягує" до себе лужний іон Li, який тягне за собою Al і формує структуру сподумену $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$.

Дослідження керну рідкіснометалевих пегматитів УЩ і геокристалохімічні міркування дають змогу дійти таких висновків.

1. Провідна роль Si, Al, Ca, Mg, Na і K у пегматитовому розплаві віддзеркалюється у вигляді ранніх польовошпатових і кварцових зон, які заховали у пегматитовій жилі сподуменову мінералізацію, тобто зони зі сподуменом і петалітом не варто шукати серед перших. Наприклад, у пегматитах альбітового типу Крутої Балки (Rozanov and Lavripenko, 1979) маємо таку зональність (від зальбандів до центру жили): апографічна кварц-альбіт-мікроклінова зона, цукроподібного альбіту та клевеландиту, кварц-сподумен-альбітова, мусковітова.

2. Анатомія пегматитових жил і тіл — виразний показник геокристалохімічної ситуа-

ції. Остання до певної міри корелює з термодинамічними параметрами. Так, високий тиск, який сприяє появі сподумену, ймовірно, супроводжується добре структурованим розплавом, і як наслідок — формування більш-менш упорядкованої зональності. Такий шлях розвитку рідкіснометалевого об'єкта можна назвати еволюційним.

3. У Шевченківському родовищі формування пегматитів відбувалось у динамічно нестабільних тектонічних умовах. Тектонічне втручання спричиняло зниження тиску, і як наслідок замість сподумену ріс петаліт у повній узгодженості з кристалохімією та геокристалохімією цих мінералів. Такий шлях розвитку пегматитів напрошується назвати еволюційно-революційним.

4. Кардинально змінили, внаслідок дії глибинних флюїдних потоків, свою первісну анатомію і мінералогію рідкіснометалеві пегматити Інгульського мегаблока. У них головним рудним мінералом є петаліт. Цей шлях розвитку пегматитів доцільно назвати революційним.

У літературі описані непоодинокі випадки утворення слюди в гранітних пегматитах метасоматичним шляхом (Lazarenko et al., 1973), зокрема у камерних пегматитах Волині. Перетин лейстами слюди кварц-польовошпатових магматичних утворень, наявність у них мірмекітів SiO_2 з газовими включеннями, насиченість слюди цими включеннями дають підставу стверджувати, що лепідомелан у постмагматичну стадію утворився метасоматично.

Однак метасоматичний спосіб виникнення слюд не єдиний. За певних умов кристалізації у лампрофірах та інших типах вивержених порід біотити утворюються безпосередньо з розплаву. Можливість утворення слюд у такий спосіб доведена експериментально (Leyzerzon, 1962). Гранітні пегматити в цьому сенсі є специфічними утвореннями, оскільки теоретично можлива кристалізація слюд з розплаву в них не реалізується.

Це явище можливо пояснити на засадах кристалохімічних уявлень про кристалізацію магми. М.В. Белов із співробітниками (Belov et al., 1970) неодноразово зазначали (див. вище), що у всіх силікатних процесах основною динамічною одиницею є молекула

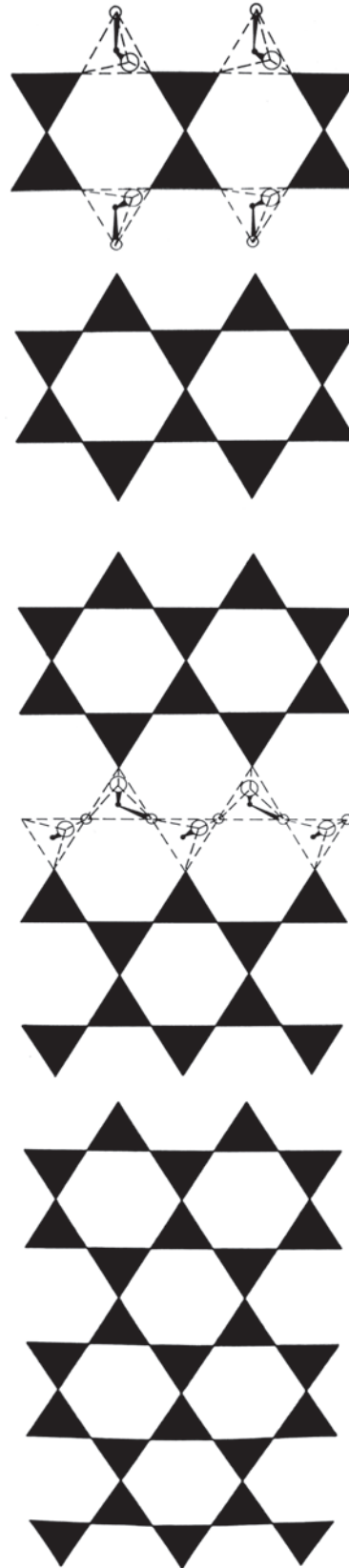


Рис. 6. Схема утворення слюдяної сітки шляхом силіфікації амфіболової стрічки (Lazarenko et al., 1973)

Fig. 6. The scheme of mica mesh formation through the silicification of an amphibole chain (Lazarenko et al., 1973)

SiO_2 , а не тетраedr $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Під час кристалізації кремнезем переходить з рідкої фази у кристалічну у вигляді молекули SiO_2 , яка приєднується до кристала (силіфікує його) та перетворюється на основну архітектурну одиницю силікатів — тетраedr $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Виходячи з цього, формування шаруватої структури в розплаві можливе за рівнянням $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-} + 2\text{SiO}_2 \rightarrow [\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$, тобто шляхом силіфікації металанцюжка, який утворився внаслідок силіфікації ортогруп $[\text{SiO}_4]^{4-}$. За загальною схемою цих перетворень (рис. 5), імовірно, проходить кристалізація слюд у вивержених породах основного та кислого типів. Теоретично можна уявити ще один спосіб утворення слюд — через силіфікацію амфіболових стрічок, появи яких передують формування діортогруп $2[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-} + 4\text{SiO}_2 \rightarrow 3[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$. Також можна припустити утворення слюд унаслідок конденсації амфіболових стрічок.

У таких умовах, за експериментальними даними, залізисті слюди нестійкі. Через це остання схема утворення слюд у пегматитах малоімовірна. Найвірогіднішими видаються перша та друга схеми (рис. 5, 6), однак натурні спостереження показали, що в гранітних пегматитах цього не відбувається. Це може бути пов'язано з кристалохімічним станом пегматитової магми, обумовленим специфікою її хімічного складу.

Якщо ми маємо у природі таку ситуацію, як, наприклад, у камерних пегматитах, коли тіла оточені материнськими гранітами, котрі поглинули під час своєї кристалізації необхідні для утворення шаруватих структур попередники $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ та $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$, то пегматит, що формується, отримав у спадок розплав, який істотно збіднений цими угрупованнями і сформований переважно алюмосилікатним каркасом (в'язю). Такий тривимірний

каркас теоретично не силіфікується до двовимірної слюдяної сітки: $[\text{SiO}_2]_{\infty\infty} + \text{SiO}_2 \neq [\text{Si}_4\text{O}_{10}]_{\infty\infty}^{4-}$. Оскільки реакція каркас — слюдяна сітка у розплаві не розв'язується, то слюдоутворювальні компоненти вимушено "виштовхуються" з магматичної стадії кристалізації пегматитів. Через це процес утворення слюд настає лише на постмагматичній стадії.

Висновки. 1. У процесі формування пегматитів певну роль відіграє структура пегматитоутворювального середовища, особлива його еволюція.

2. У силікатних системах тетраedr $[\text{SiO}_4]$ є лише статичною одиницею, а динамічною у пегматитовому розплаві є незаряджена молекула SiO_2 .

3. Перша і найголовніша особливість геокристалохімії камерних і рідкіснометалевих пегматитів Українського щита — істотна збідненість їхніх пегматитових розплавів на атоми Mg (Fe) (ліва гілка схеми Боуена — Белова) і Ca (права гілка), які "поглинули" олівіні, піроксени, амфіболи, біотити, Саплагіоклази.

4. Літій у пегматитовому розплаві виконує роль деполімеризатора, тобто "руйнівника" каркасних структур пегматитового розплаву.

5. Передбачається орієнтовно така схема утворення сподумену: 1) молекули SiO_2 приєднуються до О-кінцівок раніше утворених тетраедрів і створюють ланцюжкове угруповання $[\text{SiO}_4]^{4-} + \text{SiO}_2 \rightarrow [\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$; 2) це кисле угруповання "притягує" до себе лужний іон Li, який тягне за собою Al і формує структуру сподумену $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$.

6. За режимом формування рідкіснометалевих пегматитів Українського щита поділяють на три категорії — пегматити, що сформувались еволюційним шляхом, еволюційно-революційним і революційним.

REFERENCES / ЛІТЕРАТУРА

- Anfilogov, V.N. (1977), *Reps Acad. Sci. USSR*, Vol. 237, No. 4, pp. 915-918 [in Russian].
 [Анфилогов, В.Н. (1977), Докл. АН СССР. 237, № 4. С. 915—918.]
 Bakarzhiev, A.Kh., Makivchuk, O.F., Ivanov, B.N., Eremenko, G.K. and Pavkin, V.P. (2000), *Mineral Resources Ukraine*, No. 1, Kyiv, pp. 16-19 [in Russian].
 [Бакаржиев, А.Х., Макивчук, О.Ф., Иванов, Б.Н., Еременко, Г.К., Павкин, В.П. (2000), *Мінерал. ресурси України*. № 1. С. 16—19.]
 Belov, N.V. (1976), *Ocherki po strukturnoy mineralogii*, Nedra, Moscow, 344 p. [in Russian].
 [Белов, Н.В. (1976), *Очерки по структурной минералогии*. Москва: Недра. 344 с.]

- Belov, N.V., Belova, E.N., Litvinskaya, G.P. and Kharitonov, Yu.A. (1970), *Vestnik Moskovsk. Univ., Ser. 4, Geologia*, Moscow. Gos. Univ. Publ., Moscow, pp. 8-25 [in Russian].
- [Белов, Н.В., Белова, Е.Н., Литвинская, Г.П., Харитонов, Ю.А. (1970), *Вест. Московск. ун-та. Сер. 4. Геол.* Москва: Изд-во Моск. гос. ун-та. С. 8—25.]
- Ginzburg, A.I., Timofeyev, I.N. and Feldman, L.G. (1979), *Osnovy geologii granitnykh pegmatitov*, Nedra, Moscow, 296 p. [in Russian].
- [Гинзбург, А.И., Тимофеев, И.Н., Фельдман, Л.Г. (1979), *Основы геологии гранитных пегматитов*. Москва: Недра. 296 с.]
- Gursky, D.S., Yesypchuk, K.Yu., Kalinin, V.I., Kulish, Ye.O., Nechaev, S.V., Tretyakov, Yu.I. and Shumlyanskyi, V.O. (2006), *Metallic and non-metallic deposits of Ukraine*, Vol. 1, *Metallic deposits*, in Shcherbak, M.P. and Bobrov, O.B. (eds), Publ. House Center Europe, Kyiv, Lviv, pp. 270-275 [in Ukrainian].
- [Гурський, Д.С., Єсипчук, К.Ю., Калінін, В.І., Куліш, Є.О., Нечаєв, С.В., Третяков, Ю.І., Шумлянський, В.О. (2006), *Металічні і неметалічні корисні копалини України*. Т. 1. *Металічні корисні копалини*. Наук. ред. М.П. Щербак, О.Б. Бобров. Київ-Львів: Центр Європи. С. 270—275.]
- Isakov, L.V. and Bobrov, O.B. (2000), *Mineral. Resources Ukraine*, No. 1, Kyiv, pp. 23-30 [in Ukrainian].
- [Ісаков, Л.В., Бобров, О.Б. (2000), *Мінерал. ресурси України*. № 1. С. 23—30.]
- Kichurchak, V.M. (1988), *Zakonomernosti lokalizatsii, stroeniya i proiskhozhdeniya pegmatitov v odnom iz rayonov Ukrainського shchita*, Autoref. PhD. diss. of geol.-min. sci., Kyiv, 14 p. [in Russian].
- [Кичурчак, В.М. (1988), *Закономерности локализации, строения и происхождения пегматитов в одном из районов Украинского щита*: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев. 14 с.]
- Kushev, V.S. (1960), *Mineral. Coll. Lviv. Univ.*, No. 4, Lviv, pp. 357-362 [in Russian].
- [Кушев, В.Г. (1960), *Мінерал. сб. Львов. гос. ун-та*. № 4. С. 357—362.]
- Lazarenko, E.K., Pavlyshyn, V.I., Latysh, V.T. and Sorokin, Yu.H. (1973), *Mineralogiya i genezis kamernykh pegmatitov Volyni, Vyshcha shkola*, Lvov, 359 p. [in Russian].
- [Лазаренко, Е.К., Павлишин, В.И., Латыш, В.Т., Сорокин, Ю.Г. (1973), *Минералогия и генезис камерных пегматитов Волыни*. Львов: Вища школа. 359 с.]
- Leyzerzon, M.S. (1962), *Sinteticheskaya slyuda*, Gosenergoizdat, Moscow; Leningrad, 94 p. [in Russian].
- [Лейзерзон, М.С. (1962), *Синтетическая слюда*. Москва-Ленинград: Госэнергоиздат. 94 с.]
- Nechaev, S.V., Makivchuk, O.F., Belykh, N.A., Ivanov, B.N., Kuzmenko, A.V., Prytkov, F.Ya., Bondarenko, S.N., Buhaenko, V.N. and Syomka, V.A. (1991), *Geol. Journ.*, No. 4, Kyiv, pp. 119-122 [in Russian].
- [Нечаев, С.В., Макивчук, О.Ф., Белых, Н.А., Иванов, Б.Н., Кузьменко, А.В., Прытков, Ф.Я., Бондаренко, С.Н., Бугаенко, В.Н., Сёмка, В.А. (1991), *Геол. журн.* № 4. С. 119—122.]
- Pavlyshyn, V.I., Matkovskiy, O.I. and Dovgiy, S.O. (2021), *Genesis of minerals*, 3rd ed., Kyiv, 676 p. [in Ukrainian].
- [Павлишин, В.І., Матковський, О.І., Довгий, С.О. (2021), *Генезис мінералів*. Третє вид. Київ. 676 с.]
- Rozanov, K.I. and Lavrinenko, L.F. (1979), *Rare-metal pegmatites of Ukraine*, Nauka, Moscow, 140 p. [in Russian].
- [Розанов, К.И., Лавриненко, Л.Ф. (1979), *Редкометалльные пегматиты Украины*. Москва: Наука. 140 с.]
- Sokolov, Yu.M. (1981), In: *Metamorfogennoe obrazovanie nizkoterperaturnykh fatsiy i ultrametamorfizma*, Nauka, Moscow, 300 p. [in Russian].
- [Соколов, Ю.М. (1981), *Главные особенности метаморфогенного рудообразования пегматитов докембрия*. В кн.: *Метаморфогенное образование низкотемпературных фаций и ультраметаморфизма*. Москва: Наука. 300 с.]
- Syomka, V.O., Ponomarenko, O.M., Stepanyuk, L.M., Bondarenko, S.M., Sukach, V.V., Kurylo S.I. and Donskyi, M.O. (2022), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 44, No. 4, Kyiv, pp. 102-124 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.04.102>
- [Сьомка, В.О., Пономаренко, О.М., Степанюк, Л.М., Бондаренко, С.М., Сукач, В.В., Курило, С.І., Донський, М.О. (2022), *Мінерал. журн.* 44, № 4. С. 102—124.]
- Trufanova, L.G. and Glyuk, D.S. (1986), *Usloviya obrazovaniya litiyevykh mineralov*, Nauka, Novosibirsk, 151 p. [in Russian].
- [Труфанова, Л.Г., Глюк, Д.С. (1986), *Условия образования литиевых минералов*. Новосибирск: Наука. 151 с.]
- Yesin, O.A. and Geld, P.V. (1966), *Fizicheskaya khimiya pirometallurgicheskikh protsessov*, Ch. 2, Metallurgiya, Moscow, 703 p. [in Russian].
- [Есин, О.А., Гельд, П.В. (1966), *Физическая химия пирометаллургических процессов*. Ч. 2. Москва: Металлургия. 703 с.]

Received 25.12.2024

V.I. Pavlyshyn, DrSc (Geology, Mineralogy), Prof.,
Academician of the AS Higher School of Ukraine, Head of Department
E-mail: V.I.Pavlyshyn@gmail.com; ResearcherID: D-6558-2019

D.A. Yaroshchuk, Graduate Student
E-mail: mitya.yaroshchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0190-8611>

I.M. Lunova, PhD (Geology), Research Fellow
E-mail: gerasimetsirina@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4670-0216>

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

LITHIUM IN THE SUBSOIL OF UKRAINE

Part 9. Genesis of lithium-bearing objects: geocrystallochemistry
of rare-metal pegmatites of the Ukrainian Shield

For the first time, an attempt has been made to characterize pegmatites geocrystallochemically, that is, from the perspective of mineral chemistry polymerization, to clarify the composition, structure, and properties of mineral-forming environments. In general, within this theory, the leading reaction in silicates is of the type $2[\text{SiO}_4] \rightarrow [\text{Si}_2\text{O}_7] + \text{O}$ that is accompanied by the release of free oxygen. According to M.V. Belov, whose opinion has been confirmed by our research, the $[\text{SiO}_4]$ tetrahedron in the pegmatite melt is only a static unit, and the dynamic unit is the uncharged SiO_2 molecule, in the form of which, silicon passes ("jumps"), by figurative expression of M.V. Belov, from one "lattice" to another, from the liquid phase to the crystalline phase. This feature of the pegmatite melt, complicated by mineralizers (volatile components), is laid as foundation for the geocrystallochemistry of rare-metal, partially chamber pegmatites of the Ukrainian Shield. In the pegmatite melt, lithium ions act as a depolymerizer, i.e. a "destroyer" of framework structures. The spodumene formation scheme is assumed as follows: SiO_2 molecules attach to the oxygen bonds of pre-existing $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tetrahedra, forming a chain group $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$. This acidic group then "attracts" an alkaline lithium ion, which pulls aluminum and forms the structure of spodumene, $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$.

Keywords: pegmatite, geocrystallochemistry, silicate, aluminosilicate, melt, silicification, magma differentiation, spodumene, petalite.