МІНЕРАЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ
MINERALOGICAL JOURNAL
(UKRAINE)

https://doi.org/10.15407/mineraljournal.48.02.031
УДК 549.619:546.65 (292.451./454)

**В.М. Бельський** [1,*], канд. геол. наук, старш. наук. співроб.
E-mail: belskyi_vm@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-7990-1386
**Г.О. Кульчицька** [1], д-р геол. наук, гол. наук. співроб.
E-mail: kulchec@ukr.net; https://orcid.org/0000-0002-7206-4797
**К.І. Гоголев** [1], канд. геол. наук, мол. наук. співроб.
E-mail: skalpel2008@ukr.net; https://orcid.org/0000-0002-7727-9965
**В.Я. Гищин** [2], магістр геології
E-mail: terranautvg@gmail.com; https://orcid.org/0009-0009-7612-9672
**Є.Б. Поляченко** [3], канд. геол. наук, старш. наук. співроб.
E-mail: poliachenkoib@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3316-4605
[1] Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, м. Київ
[2] Українське мінералогічне товариство, м. Київ
[3] Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, м. Київ

* Листування.

# РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИЙ СИЛІКАТ ІЗ ЕФУЗИВНОЇ ПОРОДИ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

*Карпатський регіон дуже бідний на рідкісноземельні мінерали. Досі було відомо лише про фосфати Ce і Y в давніх породах Мармароського масиву. Знахідка силікату із надгрупи епідоту в спілітизованих мезозойських базальтах чивчинської світи ($J_3$-$K_1$) стала першою в Українських Карпатах. Характерною рисою базальтів за даними рентгенофлуоресцентного аналізу є вміст REE і Co вище кларкового та підвищений уміст інших рідкісних елементів — Ba, Sr, Zr, Cr, Rb. За результатами мікрозондових хімічних аналізів мінерал ідентифіковано як аланіт-(Ce) з дефіцитом REE і Fe, які компенсуються Ca і Al відповідно. Аланіт у парагенезисі з кварцом (халцедон), титанистим магнетитом, кальцитом і хлоритом утворює ниркоподібні агрегати розміром до 100 мкм, приурочені до зони контакту ефузиву із ксенолітом терригенно-карбонатної породи, поблизу прожилка кальциту. Мікроскопічні коричнево-бурі індивіди аланіту (10—20 мкм) в агрегатах анізотропні, слабо плеохроюють. Середній склад мінералу за даними восьми замірів відповідає формулі $Ca_{1,48}REE_{0,46}Al_{2,26}Fe_{0,74}Si_{3,07}O_{12}(OH)$. Мінерал утворився внаслідок взаємодії базальтової магми (ймовірно лужної спеціалізації) з терригенно-карбонатною породою в умовах зеленосланцевої фації метаморфізму, ближче до епідот-амфіболітової (300—500 °C). Існувало припущення, що ниркоподібна форма агрегатів успадкована від органогенних решток у вапняках. Вірогіднішою видається ліквацiйна гіпотеза, суть якої в утворенні, внаслідок взаємодії базальтової лави з вапняком, відокремлених кулястих крапель силікатно-карбонатного розплаву. Аланіт у парагенезисі з іншими мінералами є результатом кристалізації цього розплаву. Ліквацiйна гіпотеза утворення ниркоподібних агрегатів узгоджується з візуальними фактами, зокрема формою і поширенням агрегатів, близьким мінеральним складом, зональною будовою тощо. Знахідка аланіту серед збагачених на рідкісні елементи базальтів чивчинської світи відкриває перспективу пошуку інших мінералів із цими елементами.*

***Ключові слова:*** *аланіт-(Ce), ниркоподібні агрегати, чивчинська світа, ліквація.*

Цитування: Бельський В.М., Кульчицька Г.О., Гоголев К.І., Гищин В.Я., Поляченко Є.Б. Рідкісноземельний силікат із ефузивної породи Українських Карпат. *Мінерал. журн.* 2026. **48**, № 2. С. 31—41. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.48.02.031

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2026. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

**Вступ.** На тлі сучасного світового ажіотажу щодо рідкісноземельних мінералів кожна нова знахідка мінералу з *REY* (рідкісноземельні елементи (*REE*) + Y) заслуговує на увагу. В Україні відомо 59 мінеральних видів з формульними *REY* та ще низка відмін мінералів, де ці елементи містяться як суттєві домішки (Pavlyshyn et al., 2022). З них 18 видів належать до класу силікатів, решта, за *Strunz-mindat* (2026) *Classification* (https://www.mindat.org/strunz.php) — оксиди (15), карбонати (13), фосфати (6) та малочисельні представники (7) інших класів. Серед силікатів домінують мінерали церію — 12 видів. Найвідоміші та найпоширеніші з-поміж них — аланіт-(Ce), бритоліт-(Ce), церит, церіаніт і чевкініт. Більшість із них виявлено на території Українського щита. Українські Карпати дуже бідні на рідкісноземельні мінерали, досі було відомо лише про два фосфати — монацит-(Ce) і ксенотим у давніх породах Мармароського масиву (Matkovskyi (ed.), 2003).

**Метою роботи** було дослідити й ідентифікувати рідкісноземельний мінерал, виявлений у зразку ефузивної породи на території Карпатського регіону.

**Методи аналізу.** Хімічний склад породи визначено методом рентгенофлуоресцентного аналізу (*WDXRF*) на приладі *ARL OPtim'X*. Висушений близько 105 °C зразок масою ~4 г подрібнили до пудри з розміром частинок 45 мкм, змішали з порошком-утримувачем *Retsch Licowax C* у співвідношенні 4 : 1 і спресували в таблетки під тиском 5 МПа. Для калібрування приладу використано сертифіковані стандарти гірських порід: *SW*, *DNC*-1*a*, *BHVO*-2, *JA*-3, *DC*73301, *SG*-3,*GSP*-2.

Мінерали діагностовано за результатами аналізів хімічного складу. За допомогою рентгенівського мікроаналізатора *JCXA*-733 з *EDS*-приставкою (прискорювальна напруга 20 кВ, сила струму 20 нА, діаметр зонда 10 мкм) та електронного мікроскопа *JSM*-6700*F* з енергодисперсійним спектрометром *JED*-2300 (прискорювальна напруга 20 кВ, сила струму 0,6 нА, діаметр зонда 1—2 мкм) отримано растрові електронномікроскопічні зображення та визначено хімічний склад мінералів. Як еталони використано мінерали з відомим умістом хімічних елементів: діопсид, авгіт, монацит тощо. Усі лабораторні дослідження виконано в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України.

**Об'єкт дослідження.** Зразки ефузивних і теригенно-карбонатних порід було відібрано під час комплексних польових досліджень у Мармароській зоні Карпат. У відслоненні на південно-західній околиці м. Рахова біля струмка Кам'яний Потік (права притока р. Тиси) на поверхню виходять породи, що за даними геологічного картування належать до чивчинської світи (Matskiv et al., 2009). Складена світа у нижній частині порфіритами і туфами, вище — туфобрекчіями, конгломератами з уламками вапняків та плитчастими пелітоморфними вапняками. За знахідками скам'янілостей вік цих порід різні автори визначали у межах від оксфорду до валанжину ($J_3$-$K_1$) (Gozhyk (ed.), 2013).

Для дослідження вибрано три зразки, різні за забарвленням і структурою. Два з них представлені бурувато-червоною і темно-зеленою ефузивними породами, третій містить ксеноліт осадової породи теригенно-карбонатного складу (рис. 1). Ефузивна порода складена цілковито хлоритизованим склом з прожилками карбонатного і силікатного складу, лейстами альбіту, мигдалинами кальциту та халцедону, вкрапленнями рудних мінералів — магнетиту, гематиту, ільменіту. Сірі вапняки чивчинської світи мають смугасту, строматолітову та стилолітову текстури і складаються на 85—95 % із кальциту, містять уламки кварцу, луски хлориту, глинисту та вуглецеву речовини, органогенні рештки.

**Хімічний і мінеральний склад порід.** За хімічним складом зразки 1 і 2 (табл. 1), згідно з міжнародною петрохімічною класифікацією (Le Maitre, 2002), відповідають нормальним базальтам, наближаючись до трахібазальтів, зокрема зр. 1. За співвідношенням Zr і $P_2O_5$, яке за даними (Floyd and Winchester, 1975) можна використати як показник складу вихідної магми, свідчить, що вона мала бути основного складу підвищеної лужності. Геохімічно найближчим до складу магми лужнобазальтового складу також є зр. 1, що характеризується високим умістом *REY* елементів: La + Ce + Y = 490 ppm. Зразки 1 і 2 дещо різняться між собою за вмістом головних породоутворювальних компонентів, зокрема лугів, CaO, $Fe_2O_3$, MgO, ймовірно, як

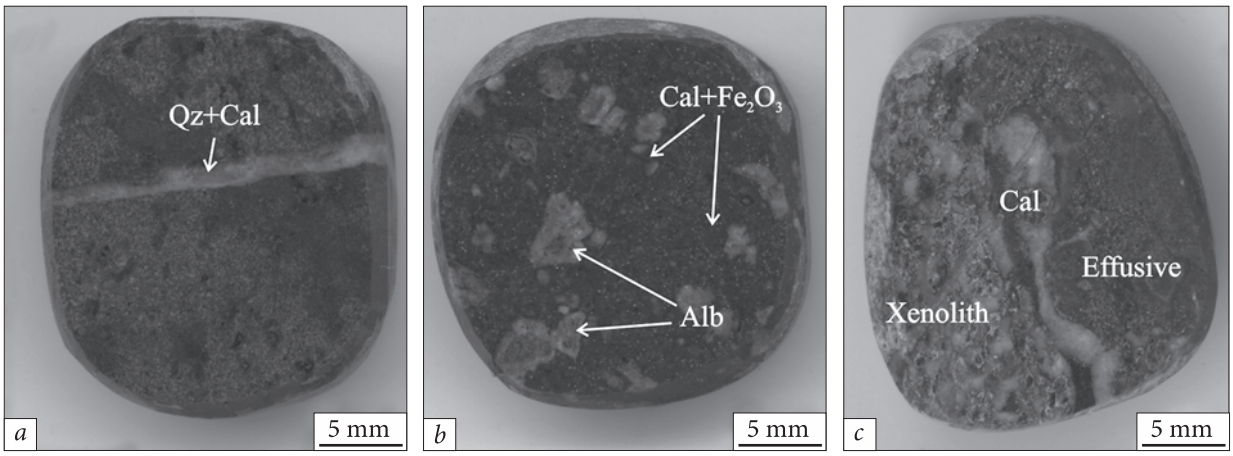


*Рис. 1.* Ефузиви чивчинської світи: *a* — зр. 1 масивної текстури з прожилками кварцу (Qz) і кальциту (Cal); *b* — зр. 2 з мигдалинами альбіту (Alb), кальциту та оксидів заліза; *c* — зр. 3 із ксенолітом теригенно-карбонатної породи і кальцитовим прожилком

*Fig. 1.* Effusive rocks of the Chyvchyn suite: *a* — sample 1 of massive texture with quartz (Qz) and calcite (Cal) veins; *b* — sample 2 with albite (Alb), calcite and iron oxide amygdalites; *c* — sample 3 with terrigenous carbonate rock xenolith and calcite vein

*Таблиця 1.* **Хімічний склад зразків ефузивів чивчинської світи за даними рентгенофлуоресцентного аналізу**

*Table 1.* **Chemical composition of effusive samples from the Chyvchyn suite, according to X-ray fluorescence analysis**

| Component | Sample | | | Component | Sample | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 |
| $SiO_2$ | 48.42 | 44.90 | 26.16 | Ba | 45 | 271 | n. d. |
| $Al_2O_3$ | 11.25 | 12.30 | 6.54 | Ce | 302 | 68 | n. d. |
| $TiO_2$ | 3.05 | 2.34 | 0.89 | Co | 114 | 91 | 16 |
| MnO | 0.14 | 0.17 | 0.08 | Cr | 92 | 55 | 74 |
| $Fe_2O_3$ | 20.74 | 13.18 | 4.71 | Hf | 2 | 3 | n. d. |
| $Na_2O$ | 4.14 | 2.69 | 0.08 | La | 175 | 34 | n. d. |
| MgO | 2.53 | 4.36 | 2.61 | Nb | n. d. | n. d. | n. d. |
| $K_2O$ | 0.18 | 0.86 | 1.22 | Rb | n. d. | 20 | 2 |
| CaO | 4.88 | 10.65 | 33.43 | Sr | 139 | 411 | 148 |
| $P_2O_5$ | 0.54 | 0.42 | 0.23 | Th | n. d. | n. d. | n. d. |
| LOI | 3.56 | 8.55 | 25.07 | Y | 13 | 19 | 7 |
| Σ | 99.2 | 100.2 | 101 | Zr | 132 | 155 | 77 |

Примітка. Тут і в табл. 2 номери зразків відповідають рис. 1. LOI — втрати від прожарювання; n. d. — не виявлено. Вміст оксидів — у %; елементів — у ppm.

Note. Here and in Table 2, the sample numbers correspond to Fig. 1. LOI — loss on ignition; n. d — not detected. Oxide content in %; elements in ppm.

наслідок різного ступеня контамінації фемічним магматичним розплавом уміщувальних карбонатних порід. Для зр. 3 очікувано характерний високий уміст Ca і втрат від прожарювання. Особливо нерівномірно між зразками розподілені мікроелементи, зокрема Ba, Sr, Ce і La (інші *REE* не визначали). Це непрямо свідчить про наявність мінералів цих елементів (бариту, вітериту, стронціаніту тощо), нерівномірне поширення яких знайшло відображення в результатах аналізу.

Результати мікрозондового аналізу підтверджують таке припущення. Окрім наскрізних хлориту, кварцу (халцедон), кальциту, ільменіту й гематиту в зразках ідентифіковано гранат (гросуляр), барит, титаніт,

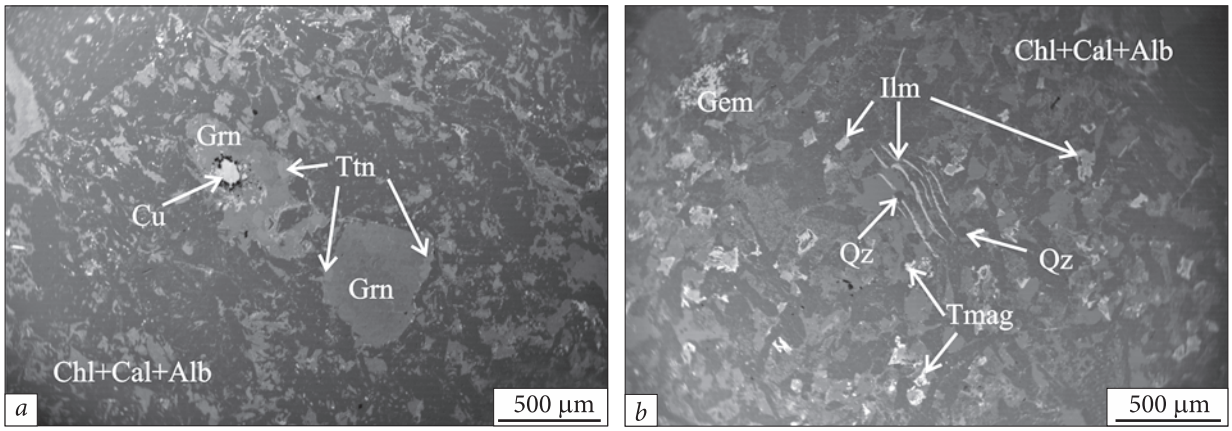


*Рис. 2.* Типовий мінеральний склад зразків ефузивів чивчинської світи, електронний мікроскоп *JXA*-733 (*JEOL*): *a* — зр. 1, *b* — зр. 2. *Позначення*: Alb — альбіт, Cal — кальцит, Chl — хлорит, Cu — мінерал міді, Gem — гематит, Grn — гранат, Ilm — ільменіт, Qz — кварц, Tmag — титанистий магнетит, Ttn — titanite

*Fig. 2.* Typical mineral composition of samples of effusives of the Chyvchyn suite: *a* — sample 1, *b* — sample 2. Alb — albite, Cal — calcite, Chl — chlorite, Cu — copper mineral, Gem — hematite, Grn — garnet, Ilm — ilmenite, Qz — quartz, Tmag — Ti-magnetite, Ttn — titanite

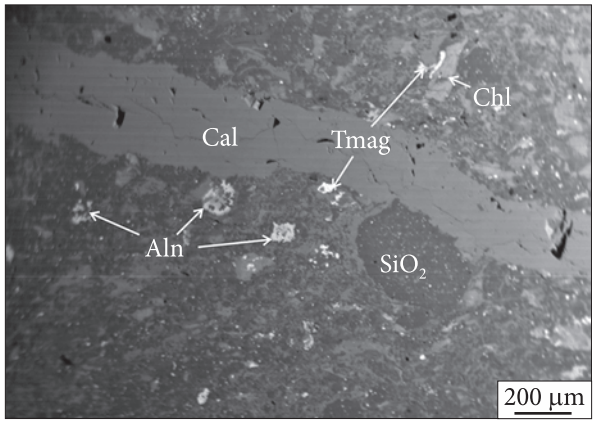


*Рис. 3.* Ниркоподібні агрегати аланіту (Aln) з ореолом із індивідів халцедону (темніші ділянки). Растрове електронномікроскопічне зображення, електронний мікроскоп *JXA*-733 (*JEOL*). Позначення мінералів відповідають рис. 2

*Fig. 3.* Reniform aggregates of allanite (Aln) with a halo of chalcedony individuals (darker areas). SEM image. Mineral abbreviations correspond to Fig. 2

апатит, галіт, мінерали Cu та силікат церію (табл. 2; рис. 2). Зразки 1 і 2 характеризуються альбіт-кальцит-хлоритовою матрицею, типовою для спілітизованих базальтів, що зазнали взаємодії з водою, та містять складної будови порфірові виділення інших мінералів. Порфірові виділення гросуляру, всередині яких діагностовано збагачену на Cu мінеральну фазу (ймовірно, хризоколу), оточені облямівкою з титаніту (рис. 2, *a*). В іншому зразку порфіроподібні скупчення халцедону містять пластинчасті індивіди ільменіту, що перешаровуються зі смугами кремнезему (рис. 2, *b*).

Зразок 3 відрізняється від попередніх насамперед наявністю ниркоподібних агрегатів, у яких виявлено *REE*-силікат, близький за складом до аланіту.

**Хімічний склад *REE*-силікату.** Ниркоподібні агрегати виявлено в зоні контакту ефузиву із ксенолітом карбонатної породи. Вони виділяються розмірами (50—100 мкм) на тлі дрібнозернистої альбіт-кальцит-хлоритової маси разом із ще більшими скупченнями халцедону (рис. 3). У прохідному світлі агре-

*Таблиця 2.* **Мінеральний склад порід**
*Table 2.* **Mineral composition of rocks**

| Mineral | Sample | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Albite | + | + | — |
| Kalispar | — | — | + |
| Muscovite | — | — | + |
| Titanite | + | + | — |
| Titanium magnetite | — | + | + |
| Apatite | — | — | + |
| Barite | — | + | — |
| Halite | — | — | + |
| Grossular | + | + | — |
| Cu-sulfide | + | + | — |
| REE-silicate | — | — | + |

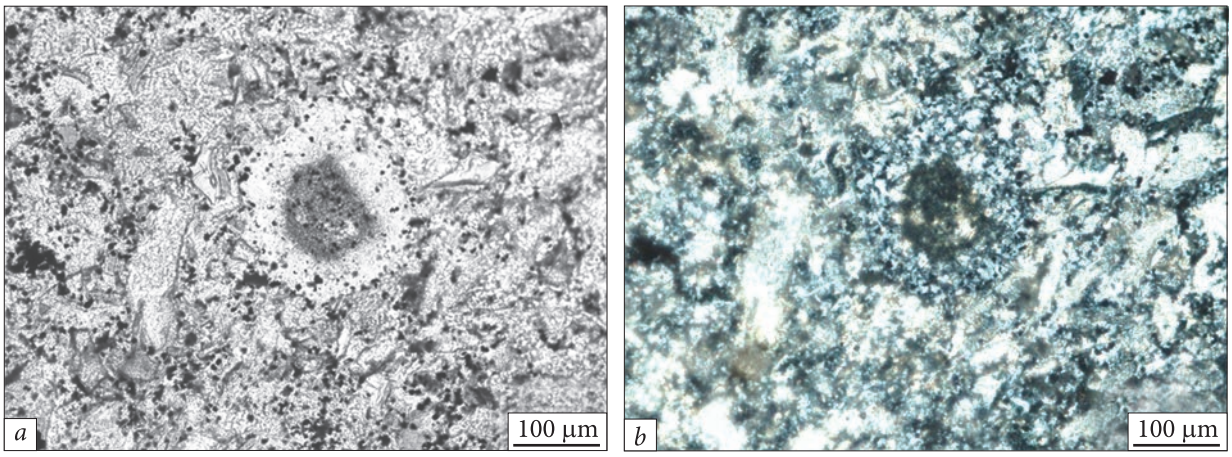


*Рис. 4.* Аланіт у силікатно-карбонатній матриці з ореолом індивідів халцедону і кальциту, поляризаційний мікроскоп *Carl ZEISS AXIO*: *a* — без аналізатора; *b* — з аналізатором

*Fig. 4.* Allanite in a silicate-carbonate matrix with a halo of chalcedony and calcite individuals: *a* — without analyzer; *b* — with analyzer

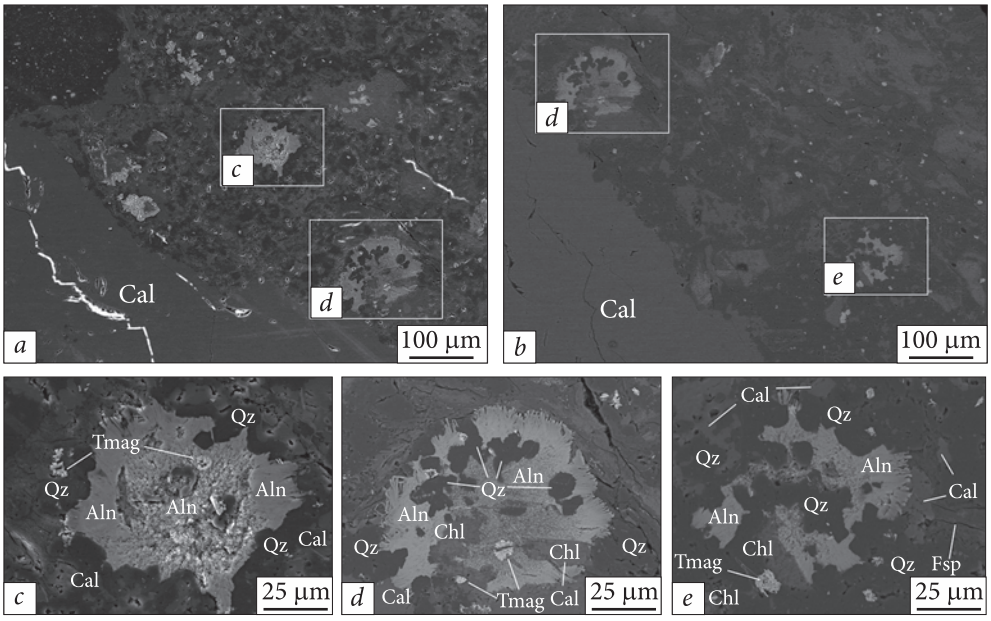


*Рис. 5.* Ниркоподібні агрегати з аланітом (Aln). Найтемніші ділянки виповнені кварцом (Qz). Cal — кальцит, Chl — хлорит, Tmag — титанистий магнетит, Fsp — польовий шпат. Електронний мікроскоп *JSM*-6700*F*, *JEOL*, режим вимірювань: *a*, *c* — *LEI*; *b*, *d*, *e* — *COMPO* (аналітик — Ю.О. Литвиненко)

*Fig. 5.* Reniform aggregates with allanite (Aln). The darkest areas are filled with $SiO_2$ (Qz). Cal — calcite, Chl — chlorite, Tmag — Ti-magnetite; (*a*, *c* — LEI imaging mode; *b*, *d*, *e* — COMPO). Electron microscope JSM-6700F, JEOL (analyst — Yu.O. Lytvynenko)

гати світло-коричневого або бурого кольору з помітним ореолом із безбарвних мінералів (кварцу, кальциту), що відрізняються текстурою від основної маси (рис. 4). Індивіди аланіту в агрегатах розміром 10—20 мкм слабо анізотропні, з ледве помітним плеохроїзмом у коричневих тонах. Тісно асоціюють з титанистим магнетитом, хлоритом, халцедоном та кальцитом. Ці самі мінерали утворюють ореоли довкола ниркоподібних агрегатів (рис. 5).

Результати хімічного аналізу мінералу в ниркоподібних агрегатах (табл. 3) підтвердили його близький до аланіту склад і коливання вмісту лантанідів в окремих індивідах. Вміст Y, Th та U нижчий за поріг визначення. Існує позитивна кореляція між умістом Ce, La і Fe у мінералі, водночас чітка нега-

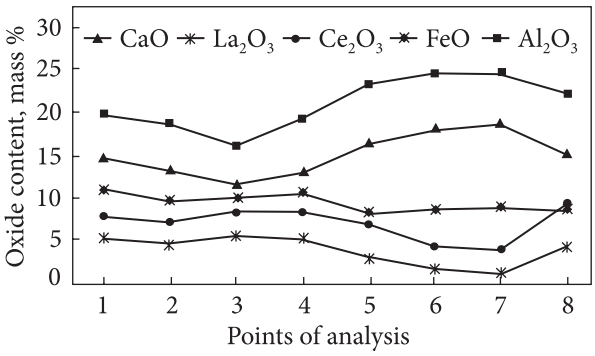


*Рис. 6.* Кореляція головних компонентів у аланіті-(Ce)
*Fig. 6.* Correlation of the main components in allanite-(Ce)

тивна кореляція між цими елементами, з одного боку, і Ca, Al, з іншого (рис. 6). Ідеальна формула аланіту — $Ca(REE,Y)(Al_2Fe^{2+})(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$. Розраховані на вісім катіонів кристалохімічні формули *REE*-силікату з ефузивів чивчинської світи свідчать про очевидний дефіцит *REE*, позиції яких доповнені кальцієм, і дефіцит Fe, позиції якого заміщує алюміній:

1) $Ca_{1,45}(Ce_{0,26}La_{0,18}Nd_{0,05})Al_{2,14}Fe_{0,84}Si_{3,08}O_{12}(OH)$;
2) $Ca_{1,43}(Ce_{0,27}La_{0,17}Nd_{0,05})Al_{2,20}Fe_{0,81}Si_{3,06}O_{12}(OH)$;
3) $Ca_{1,37}(Ce_{0,33}La_{0,22}Nd_{0,03})Al_{2,08}Fe_{0,93}Si_{3,03}O_{12}(OH)$;
4) $Ca_{1,36}(Ce_{0,30}La_{0,18}Nd_{0,04})Al_{2,21}Fe_{0,86}Si_{3,05}O_{12}(OH)$;
5) $Ca_{1,51}(Ce_{0,22}La_{0,09}Pr_{0,06}Nd_{0,07})Al_{2,35}Fe_{0,59}Si_{3,09}O_{12}(OH)$;
6) $Ca_{1,62}(Ce_{0,13}La_{0,05}Pr_{0,04}Nd_{0,08})Al_{2,41}Fe_{0,60}Si_{3,05}O_{12}(OH)$;
7) $Ca_{1,65}(Ce_{0,12}La_{0,03}Pr_{0,06}Nd_{0,05})Al_{2,37}Fe_{0,62}Si_{3,10}O_{12}(OH)$;
8) $Ca_{1,42}(Ce_{0,29}La_{0,14}Pr_{0,09}Nd_{0,07})Al_{2,30}Fe_{0,63}Si_{3,06}O_{12}(OH)$.

Домінування Ce серед *REE* дає змогу ідентифікувати знайдений мінерал як церієвий вид у групі аланіту надгрупи епідоту — аланіт-(Ce), із загальною для восьми точок аналізу формулою $Ca_{1,48}REE_{0,46}Al_{2,26}Fe_{0,74}Si_{3,07}O_{12}(OH)$.

**Поширення аланіту-(Ce).** Аланіт (синонім — ортит) в Україні вважають поширеним акцесорним мінералом (Shcherbak (ed.), 1990). Він характерний для багатьох пегматитів, гранітів і сієнітів Українського щита, особливо

*Таблиця 3.* **Хімічний склад аланіту і коефіцієнти кристалохімічних формул**
*Table 3.* **Chemical composition of allanite and coefficients of crystallochemical formulas**

| Component | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Average value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | 19.71 | 18.6 | 16.05 | 19.32 | 23.27 | 24.52 | 24.54 | 22.19 | 21.03 |
| $SiO_2$ | 33.53 | 30.4 | 27.57 | 31.44 | 36.04 | 36.5 | 37.81 | 34.73 | 33.50 |
| CaO | 14.69 | 13.3 | 11.66 | 13.09 | 16.44 | 18.12 | 18.79 | 15.04 | 15.14 |
| $TiO_2$ | 0.02 | 0 | 0.12 | 0.53 | 0.67 | 0.89 | 0 | 0 | 0.28 |
| FeO | 10.92 | 9.69 | 10.08 | 10.60 | 8.26 | 8.65 | 8.98 | 8.59 | 9.47 |
| $La_2O_3$ | 5.29 | 4.6 | 5.53 | 5.14 | 2.91 | 1.65 | 1.11 | 4.3 | 3.82 |
| $Ce_2O_3$ | 7.79 | 7.23 | 8.29 | 8.36 | 7.09 | 4.39 | 3.99 | 9.15 | 7.04 |
| $Pr_2O_3$ | n. a. | n. a. | n. a. | n. a. | 1.94 | 1.39 | 1.62 | 2.16 | 1.78 |
| $Nd_2O_3$ | 1.62 | 1.51 | 0.61 | 1.14 | 2.39 | 2.78 | 2.08 | 2.84 | 1.87 |
| Σ | 93.57 | 85.33 | 79.91 | 89.62 | 99.01 | 98.89 | 98.92 | 99.00 | 93.03 |
| Σ*REE* | 14.70 | 13.34 | 14.43 | 14.64 | 14.33 | 10.21 | 8.80 | 18.45 | 13.61 |
| *Crystallochemical coefficients calculated for 8 cations* | | | | | | | | | |
| $Si^{4+}$ | 3.08 | 3.06 | 3.03 | 3.05 | 3.09 | 3.05 | 3.10 | 3.06 | 3.07 |
| $Al^{3+}$ | 2.14 | 2.20 | 2.08 | 2.21 | 2.35 | 2.41 | 2.37 | 2.30 | 2.26 |
| $La^{3+}$ | 0.18 | 0.17 | 0.22 | 0.18 | 0.09 | 0.05 | 0.03 | 0.14 | 0.13 |
| $Ce^{3+}$ | 0.26 | 0.27 | 0.33 | 0.30 | 0.22 | 0.13 | 0.12 | 0.29 | 0.24 |
| $Pr^{3+}$ | n. a. | n. a. | n. a. | n. a. | 0.06 | 0.04 | 0.06 | 0.09 | 0.06 |
| $Nd^{3+}$ | 0.05 | 0.05 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | 0.08 | 0.05 | 0.07 | 0.05 |
| $Ca^{2+}$ | 1.45 | 1.43 | 1.37 | 1.36 | 1.51 | 1.62 | 1.65 | 1.42 | 1.48 |
| $Fe^{2+}$ | 0.84 | 0.81 | 0.93 | 0.86 | 0.59 | 0.60 | 0.62 | 0.63 | 0.74 |
| Σ$REE^{3+}$ | 0.49 | 0.49 | 0.58 | 0.52 | 0.44 | 0.31 | 0.26 | 0.59 | 0.46 |

Примітка. 1—4 — аналізатор *JXA*-733; 5—8 — аналізатор *JED*-2300 *JSM*-6700*F* (аналітик — Ю.О. Литвиненко); n. a. — елемент не визначали.

Note. 1—4 — JXA-733 analyzer; 5—8 — JED-2300 JSM-6700F analyzer (analyst — Yu.O. Lytvynenko); n. a. — element not analyzed.

сублужної спеціалізації. Найпоширеніший у Приазовському мегаблоці щита. Багатий на аланіт граніт салтичанського комплексу (Shcherbakov, 2005), мінерал виявлено в рудоносній зоні Азовського родовища (Ponomarenko and Antsiferov (eds.), 2012), він складає майже мономінеральну Анадольську "дайку", запаси якої підраховано (Sheremet et al., 2017). Аланіт належить до звичайних акцесорних або навіть породоутворювальних мінералів твейтозитів чернігівського карбонатитового комплексу (Glevassky and Kryvdik, 1981), відомі виділення цього мінералу на контакті карбонатитів із фенітами, у мармурованих вапняках і скарнах Західного Приазов'я (Lazarenko (ed.), 1981). В Інгулецькому мегаблоці знахідки аланіту приурочені до сієнітів Великовисківського масиву (Gerasymets et al., 2019), у Волинському — до сієнітів Яструбецького штоку, зазвичай в асоціації з бритолітом (Ponomarenko and Antsiferov (eds.), 2012).

Мікроскопічні кристали аланіту-(Ce) виявлено в магматичних і метаморфічних породах Карпатського регіону — на території Польщі, Угорщини і Словаччини, та як поширений акцесорний мінерал він відомий лише на території Румунії, у Східних і Південних Карпатах (Udubaşa et al., 2002). Назагал Карпатський регіон дуже бідний на мінерали *REY*. Їх знахідки рідкісні, розміри індивідів мікроскопічні або містяться як включення в інших мінералах.

В Українських Карпатах знахідки аланіту були невідомі. Згадано (Udubaşa et al., 2002) лише про аланіт у зоні членування Передкарпатського прогину зі Східноєвропейською платформою. Кристали мінералу знайдено в глині карстових печер серед вапняків неогенового віку. Власне на території Українських Карпат досі було відомо лише про два мінеральні види з *REY*. Рідкісні знахідки (одиничні знаки у важкій фракції проб) ітрієвого (ксенотим) і церієвого (монацит-(Ce)) фосфатів приурочені до давніх метаморфічних і магматичних порід Мармароського масиву, дещо більший уміст зафіксовано в осадових породах від мезозою до неогену (Matkovskyi (ed.), 2003). Отже, знахідку аланіту-(Ce) в ефузивах чивчинської світи можна вважати першою знахідкою *REE*-силікату в Українських Карпатах (Belskyi et al., 2025).

**Генезис.** Підвищений уміст *REY* в ефузивах за їхньої майже повної відсутності у вапняках указує на збагачену на Fe базальтову лаву як джерело *REE*. Позитивна кореляція між умістом Ce, La і Fe у мінералі може свідчити про існування у силікатному розплаві комплексів подібних до ≡Si–O–Fe–$REE^{2+}$ як спільних транспортерів цих елементів.

Утворення аланіту, найімовірніше, зумовлено процесами контактового метасоматозу в умовах зеленосланцевої фації метаморфізму, ближче до епідот-амфіболітової, за температури 350—500 °C. Аланіт міг утворитись як результат гідротермальної взаємодії збагаченого на залізо і *REE* розплаву з органогенними карбонатними рештками вапняків. Наявність галіту непрямо свідчить про участь морської води в метасоматичному процесі.

Викликає питання ниркоподібна форма агрегатів з аланітом. Перше припущення — округла форма агрегатів успадкована від органогенних решток у вапняках, унаслідок заміщення яких вони утворились. Тоді чому ці заміщені органічні рештки мають різний розмір, розміщені купчасто саме у зоні контакту (див. рис. 5), трапляються зрідка віддалено від контакту і не знайдені всередині ксеноліту? І які саме компоненти похованих організмів спричинили кристалізацію аланіту на їхньому місці?

Друге припущення — це мигдалини, що утворилися внаслідок заповнення порожнин (везикул) від пухирців газу низькотемпературними продуктами розкристалізації вулканічного скла. Палеобазальти мигдалекам'яної (амигдалоїдної, везикулярної) структури трапляються часто, зокрема і в трапах волинської серії (Tsilmak and Skakun, 2006). Вони заповнені палагонітом, гізингеритом, хлорит-смектитовими агрегатами. Аланіт-(Ce) не належить до низькотемпературних мінералів, і форма його агрегатів, іноді навіть зірчаста, погано узгоджується з чітко окресленими межами везикул. Залишається незрозумілим приурочення основної маси передбачуваних газових пухирців до прожилка з карбонатом.

До цього питання можна підійти з іншого боку, взявши до уваги ліквацiйні процеси, які закономірно відбувались у лаві під час

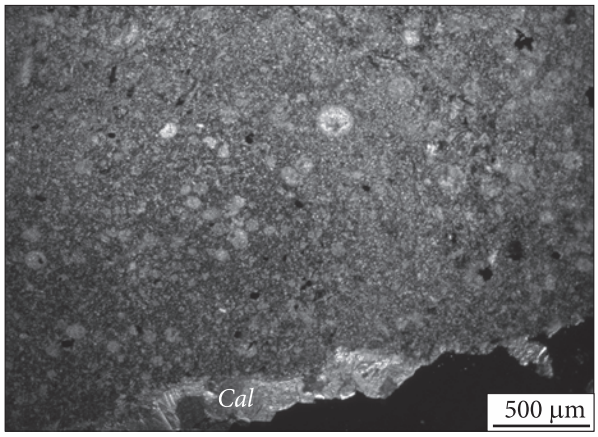


*Рис. 7.* Закристалізовані мікроглобули карбонатного розплаву в ксеноліті теригенно-карбонатної породи поряд з прожилком кальциту (Cal), мікроскоп *Carl Zeiss AXIO*, у прохідному світлі

*Fig. 7.* Crystallized microglobules of carbonate melt in a xenolith of terrigenous-carbonate rock next to a calcite vein (Cal). In transmitted light (microscope Carl Zeiss AXIO)

виверження на тлі швидкого зниження температури і тиску. З точки зору фізичної хімії процеси газовиділення та ліквації ідентичні: в обох випадках відбувається розділення фаз — на рідину і газ або на дві рідини відповідно. Зміна фізичних параметрів розплаву призводить до його розділення на рідкі фази різного складу, насамперед відокремлення сольових компонентів, до яких належить карбонатний розплав, від силікатних, що підтверджено експериментальними роботами і неодноразово проілюстровано результатами досліджень розплавних включень (Naumov et al., 1986; Voznyak, 2007; Voznyak et al., 2010). Ліквaційні процеси у базальтовому розплаві прослідковано у розрізі заболотівської світи трапової формації Волині (Fedoryshyn et al., 2012). З позиції флюїдно-ліквaційної гіпотези розглянуто походження самородномідної мінералізації у вулканітах цієї формації (Naumko et al., 2016, 2021). Численні ознаки ліквації виявлено в сієнітах Азовського *REE*-Zr родовища (Kulchytska et al., 2020). Зазвичай для розплаву, що відділився, типовою є куляста (глобулярна) форма. Його склад не завжди монокомпонентний, але може таким стати внаслідок подальшого розділення, кристалізації тощо. Рідкісні елементи під час розділення розплавів концентруються в сольовій фазі (Brooker and Kjarsgaard, 2011; Veksler et al., 2012).

Поглинання високотемпературним лужно-базальтовим розплавом теригенно-карбонатних порід чивчинської світи могло спричинити утворення мікрокрапель карбонатного розплаву всередині лави, сегрегація яких призвела до утворення в силікатному розплаві 100 мкм глобул сольового розплаву. У такому аспекті розміщення ниркоподібних агрегатів поблизу карбонатного прожилка видається явищем невипадковим. Глобули карбонатного розплаву утворились також у самому ксеноліті теригенної породи поблизу контакту (рис. 7). Спостерігають їх коалесценцію (злипання), а всередині найбільших проглядається аланітоподібний мінерал. Відокремлений сольовий розплав, як це завжди відбувається, не був монокомпонентним, і крім карбонатної містив значну частку силікатної компоненти. Швидке охолодження лави перешкодило подальшій коалесценції глобул і призвело до кристалізації розплаву в глобулах з утворенням дрібних індивідів аланіту з різним умістом *REE* в парагенезисі з іншими мінералами, матричними зокрема.

Ліквaційна гіпотеза утворення ниркоподібних агрегатів з аланітом, фактично мигдалин, пояснює їхній різний розмір, полімінеральний склад, розміщення поблизу контакту з ксенолітом вапняку, карбонатним прожилком зокрема, варіативний склад аланіту в агрегатах, ореоли довкола агрегатів як наслідок подальшої диференціації ліквату. Позитивна кореляція між *REE* і Fe та парагенетичний зв'язок аланіту з титанистим магнетитом в агрегатах свідчать про транспортування *REE* у магмі у формі комплексів із Fe, можливо з Ti.

**Висновки.** Виявлений у чивчинській світі Мармароського масиву *REE*-силікат визначений за результатами хімічного аналізу як мінерал із групи аланіту надгрупи епідоту з помітним дефіцитом *REE* і Fe. Лантаніди займають трохи більше половини позицій від теоретично можливих, решта яких доповнена кальцієм. Дефіцит Fe, вміст якого позитивно корелює з *REE*, доповнений Al. Домінування Ce серед виявлених *REE* дає змогу ідентифікувати знайдений мінерал як аланіт-(Ce). Це перший *REE*-силікат і третій *REE*-

мінерал (після монациту і ксенотиму), знайдений в Українських Карпатах.

Аланіт-(Ce) домінує в складі ниркоподібних агрегатів у парагенезисі з хлоритом, кварцом, магнетитом, кальцитом. Агрегати приурочені до контакту спілітизованого базальту з ксенолітом карбонатного складу. Аланіт-(Ce) утворився внаслідок взаємодії збагаченої на *REE* базальтової магми, ймовірно, підвищеної лужності, з мезозойськими теригенно-карбонатними породами.

Як один із вірогідних механізмів утворення ниркоподібних агрегатів розглянуто процес ліквації базальтового розплаву після взаємодії його з вапняковою породою. Утворений у результаті сольовий розплав силікатно-карбонатного складу став осередком концентрування *REE* і Fe. Відокремлені кульки силікатно-сольового розплаву після кристалізації перетворилися на ниркоподібні агрегати з аланітом в асоціації з іншими мінералами ефузивної товщі й ореолом тих самих мінералів довкола.

Спілітизовані базальти чивчинської світи заслуговують на подальше вивчення, оскільки вміст у них *REE*, а також Co у декілька разів перевищує кларковий. Підвищений уміст характерний для інших рідкісних елементів — Ba, Sr, Zr, Cr, Rb, що робить ці породи перспективними щодо нових мінеральних видів і пошуку генетично пов'язаних з ними рудопроявів у Карпатському регіоні.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

Belskyi, V.M., Kulchytska, H.O. and Hoholev, K.I. (2025), The First Discovery of Allanite-(Ce) in the Ukrainian Carpathians, *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 6, pp. 85-91 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.06.085

[Бельський, В.М., Кульчицька, Г.О., Гоголев, К.І. (2025), Перша знахідка аланіту-(Ce) в Українських Карпатах. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* № 6. С. 85—91.]

*Brooker, R.A. and Kjarsgaard, B.A.* (2011), Silicate-Carbonate Liquid Immiscibility and Phase Relations in the System $SiO_2$ – $Na_2O$ – $Al_2O_3$ – CaO– $CO_2$ at 01-25 GPa with Applications to Carbonatite Genesis, *J. Petrol.,* Vol. **52,** Iss. 7-8, pp. 1281-1305. https://doi.org/10.1093/petrology/egq081

Fedoryshyn, Yu., Naumko, I., Nestorovych, N., Yakovenko, M. and Triska, N. (2012), The nature of algae-like works in the Volyna basalts (ontogenic aspect), *Mineral. zb.*, No. 62, Iss. 1, Lviv, pp. 63-82 [in Ukrainian].

[Федоришин, Ю., Наумко, І., Несторович, Н., Яковенко, М., Тріска, Н. (2012), Природа мигдалеподібних утворень у базальтах Волині (онтогенічний аспект). *Мінерал. зб.* № 62, вип. 1. С. 63—82.]

Floyd, P.A. and Winchester, J.A. (1975), Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 27, Iss. 2, pp. 211-218. https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90031-X

Gerasymets, I.M., Kulchytska, H.O. and Belskyi, V.M. (2019), Metamict Minerals From the Alkaline Feldspar Syenites, the Ukrainian Shield, *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 41, No. 1, Kyiv, pp. 35-48 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.41.01.035

[Герасимець, І.М., Кульчицька, Г.О., Бельський, В.М. (2019), Метаміктні мінерали з лужнопольовошпатових сієнітів Українського щита. *Мінерал. журн.* **41**, № 1. С. 35—48.]

Glevassky, E.B. and Kryvdik, S.G. (1981), *Precambrian carbonatite complex of the Azov Sea regon,* Nauk. dumka, Kyiv, 227 p. [in Russian].

[Глеваский, Е.Б., Кривдик, С.Г. (1981), *Докембрийский карбонатитовый комплекс Приазовья.* Киев: Наук. думка. 227 с.]

Gozhyk, P.F. (ed.) (2013), *Stratigraphy of the Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine,* in 2 vol., Vol. 1, Stratigraphy of the Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine, Logos, Kyiv, 637 p. [in Ukrainian].

[Гожик, П.Ф. (ред.) (2013), *Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України.* У 2-х т. Т. 1. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України. Київ: Логос. 637 с.]

Kulchytska, H.O., Chernysh, D.S. and Herasymets, I.M. (2020), Mineralogical and Thermobarometric Melt Liquation Sings in Hypersolvus Syenites (Ukrainian Shield), *Mineral. Journ.* (*Ukraine)*, Vol. 42, No. 1, Kyiv, pp. 36-48 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.42.01.036

[Кульчицька, Г.О., Черниш, Д.С., Герасимець, І.М. (2020), Мінералогічні й термобарометричні ознаки ліквації розплавів у гіперсольвусних сієнітах Українського щита. *Мінерал. журн.* **42**, № 1. С. 36—48.]

Lazarenko, E.K. (ed.) (1981), *Mineralogy of the Azov sea region,* Nauk. dumka, Kyiv, 432 p. [in Russian].

[Лазаренко, Е.К. (ред.) (1981), *Минералогия Приазовья.* Киев: Наук. думка. 432 с.]

Le Maitre, R.W. (ed.) (2010), *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, 252 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581

Matkovskyi, O.I. (ed.) (2003), *Minerals of the Ukrainian Carpathians. Borates, arsenates, phosphates, molybdates, sulfates, carbonates, organic minerals and mineraloids,* Lviv Univ. Research Center, Lviv, 344 p. [in Ukrainian].

[Матковський, О.І. (ред.) (2003), *Мінерали Українських Карпат. Борати, арсенати, фосфати, молібдати, сульфати, карбонати, органічні мінерали і мінералоїди*. Львів: ВЦ Львів. ун-ту. 344 с.]

Matskiv, B.V., Pukach, B.D., Vorobkanych, V.M., Pastukhanova, S.V. and Gnylko, O.M. (2009), *State Geological Map of Ukraine*, Scale 1:200000, Sheet M-35-XXXI (Nadvirna), Explanatory note, Kyiv, 177 p. [in Ukrainian].

[Мацьків, Б.В., Пукач, Б.Д., Воробканич, В.М., Пастуханова, С.В., Гнилко, О.М. (2009), *Державна геологічна карта України*. М-6 1 : 200000. Аркуш M-35-XXXI (Надвірна), Пояснюв. зап. Київ. 177 с.]

Naumko, I., Batsevych, N., Fedoryshyn, Yu., Pavlyuk, M., Myshchyshyn, Yu. and Repyn, I. (2021), Peculiarities of the distribution of thickness and paleo-surfase relief of basalts of Luchychi strata (Western Volyn), *Geodynamics,* No. 1 (30), pp. 36-47. https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.036

Naumko, I.M., Fedoryshyn, Yu.I. and Batsevych, N.V. (2016), Fluid-liquation hypothesis of the origin of the native copper mineralization in volcanites of a trappean formation of the Western Volyn area, *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 9, pp. 69-78 [in Ukrainian]. https://doi.org//10.15407/dopovidi2016.09.069

[Наумко, І.М., Федоришин, Ю.І., Бацевич, Н.В. (2016), Флюїдно-ліквацiйна гіпотеза походження самородномідної мінералізації у вулканітах трапової формації Західної Волині. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* № 9. С. 69—78.]

Naumov, V.B., Kovalenko, V.I., Sobolev, A.V., Tikhonenkov, P.I. and Samoilov, V.S. (1986), Immiscibility of silicate and salt melts according to the study of inclusions in high-temperature fluorite, *Reps Acad. Sci. USSR*, Vol. 288, No. 2, pp. 453-456 [in Russian].

[Наумов, В.Б., Коваленко, В.И., Соболев, А.В., Тихоненков, П.И., Самойлов, В.С. (1986), Несмесимость силикатных и солевых расплавов по данным изучения включений в высокотемпературном флюорите. *Докл. АН СССР*. **288**, № 2. С. 453—456.]

Pavlyshyn, V., Matkovskyi, O. and Dovgyi, S. (2022), *History of Mineralogy in Ukraine. From the 90s of the XX Century to this Day*, Kyiv, 608 p. [in Ukrainian]. URL: http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001377089 (Accessed: 26.01.2026).

[Павлишин, В., Матковський, О., Довгий, С. (2022), *Історія мінералогії в Україні від 90-х років XX ст. донині*. Київ. 608 с.]

Ponomarenko, A.N. and Antsiferov, A.V. (eds.) (2012), *The Azov rare-earth deposit of the Azov sea region megablock of Ukrainian Shield,* Knowlidzh, Donetsk, 374 p. [in Russian].

[Пономаренко, А.Н., Анциферов, А.В. (ред.) (2012), *Азовское редкоземельное месторождение Приазовского блока Украинского щита*. Донецк: Ноулидж. 374 с.]

Shcherbak, N.P. (ed.) (1990), *Minerals of Ukraine.* Short reference book, Nauk. dumka, Kyiv, 408 p. [in Russian].

[Щербак, Н.П. (ред.) (1990), *Минералы Украины*. Краткий справ. Киев: Наук. думка. 408 с.]

Shcherbakov, I.B. (2005), *Petrology of the Ukrainian Shield,* ZUKTS, Lviv, 366 p. [in Russian].

[Щербаков, І.Б. (2005), *Петрологія Українського щита*. Львів: ЗУКЦ. 366 с.]

Sheremet, E.M., Kryvdik, S.G. and Strekozov, S.N. (2017), *Prospects of finding out the deposits of new type of rare-earth ores in Azov area of the Ukrainian Shield,* Mezyna, V.V., Kharkiv, 244 p. [in Russian].

[Шеремет, Е.М., Кривдик, С.Г., Стрекозов, С.Н. (2017), *Перспективы обнаружения месторождений редкоземельного оруднения нового типа в Приазовье Украинского щита*. Харьков: ФЛП Мезина, В.В. 244 с.]

Tsilmak, O. and Skakun, L. (2006), Mineral composition and features of formation of smectite-chlorite aggregates from amygdules of the Volynian Vendian basalts, *Mineral. zb*., No. 56, Iss. 1-2, Lviv, pp. 127-141 [in Ukrainian].

[Цільмак, О., Скакун, Л. (2006), Мінеральний склад та особливості формування смектит-хлоритових агрегатів у мигдалинах вендських базальтів Волині. *Мінерал. зб.* № 56, вип. 1—2. С. 127—141.]

Udubaşa, Gh., Ďuda, R., Szakáll, S., Kvasnytsya, V., Koszowska, E. and Novák, M. (2002), *Minerals of the Carpathians*, Granit, Prague, 480 p.

Veksler, I.V., Dorfman, A.M., Dulski, P., Kamenetsky, V.S., Danyushevsky, L.V., Jeffries, T. and Dingwell, D.B. (2012), Partitioning of elements between silicate melt and immiscible fluoride, chloride, carbonate, phosphate and sulfate melts, with implications to the origin of natrocarbonatite, *Geochim. et Cosmochim. acta*, Vol. **79**, pp. 20-40. https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.11.035

Voznyak, D., Kulchytska, G., Vyshnevskyi, O. and Ostapenko, S. (2010), *Alkaline rocks: petrology mineralogy, geochemistry, Abstr. of sci. conf. dedic. memory J.A. Morozewich, Kyiv, Sept. 19-21, 2010,* M.P. Semenenko IGMOF NAS Ukraine, Kyiv, pp. 67-68.

Voznyak, D.K. (2007), *Microinclusions and reconstruction of endogenous mineral formation conditions,* Nauk. dumka, Kyiv, 280 p. [in Ukrainian].

[Возняк, Д.К. (2007), *Мікровключення та реконструкція умов ендогенного мінералоутворення*. Київ: Наук. думка. 280 с.]

Received 29.01.2026

*V.M. Belskyi* [1], PhD (Geology), Senior Research Fellow
E-mail: belskyi_vm@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-7990-1386
*H.O. Kulchytska* [1], DrSc (Geology), Chief Research Fellow
E-mail: kulchec@ukr.net; https://orcid.org/0000-0002-7206-4797
*K.I. Hoholev* [1], PhD (Geology), Junior Research Fellow
E-mail: skalpel2008@ukr.net; https://orcid.org/0000-0002-7727-9965
*V.Ya. Hyshchyn* [2], Master of Geology
E-mail: terranautvg@gmail.com; https://orcid.org/0009-0009-7612-9672
*Ye.B. Poliachenko* [3], PhD (Geology), Senior Research Fellow
E-mail: poliachenkoib@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3316-4605
[1] M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv
[2] Ukrainian Mineralogical Society, Kyiv
[3] S.I. Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, Kyiv

## RARE EARTH SILICATE FROM EFFUSIVE ROCK OF THE UKRAINIAN CARPATHIANS

The Carpathian region is very poor in rare earth minerals. Until now, only Ce and Y phosphates were known in ancient rocks of the Marmarosh massif. The discovery of silicate from the epidote supergroup in the spilitized Mesozoic ($J_3$-$K_1$) basalts of the Chyvchyn suite was the first in the Ukrainian Carpathians. A characteristic feature of the basalts according to X-ray fluorescence analysis is the content of REE and Co above the Clark content and an increased content of other rare elements — Ba, Sr, Zr, Cr, Rb. According to the results of microprobe chemical analyses, the mineral was identified as allanite-(Ce) with a deficiency of REE and Fe, which are compensated by Ca and Al, respectively. Allanite in paragenesis with quartz (chalcedony), titanite magnetite, calcite and chlorite forms reniform aggregates up to 100 μm in size, confined to the contact zone of the effusive with the xenolith of the terrigenous-carbonate rock, near the calcite vein. Microscopic brownish-brown individuals of allanite (10-20 μm) in aggregates are anisotropic, weakly pleochroic. The average composition of the mineral according to eight measurements corresponds to the formula $Ca_{1.48}REE_{0.46}Al_{2.26}Fe_{0.74}Si_{3.07}O_{12}(OH)$. The mineral was formed as a result of the interaction of basaltic magma (probably alkaline specialization) with terrigenous-carbonate rock under conditions of greenschist metamorphism, closer to epidote-amphibolite (300-500 °C). It was assumed that the reniformshape of the aggregates is inherited from organogenic residues in limestones. The liquation hypothesis, which is based on the formation of separated spherical drops of silicate-carbonate melt as a result of the interaction of basaltic lava with limestone, seems more likely. Allanite in paragenesis with other minerals is the result of crystallization of this melt. The liquation hypothesis of the formation of reniform aggregates is consistent with visual facts, in particular with the shape and distribution of aggregates, similar mineral composition, zonal structure, etc. The discovery of allanite among the basalts of the Chyvchyn suite enriched in rare elements opens up the prospect of searching for other minerals with these elements.

*Keywords*: allanite-(Ce), reniform aggregates, Chyvchyn suite, liquation.