МІНЕРАЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ
MINERALOGICAL JOURNAL
(UKRAINE)

https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.04.025
УДК 550.93

М.М. Решетник [1, 8], канд. геол. наук, старш. наук. співроб.
E-mail: reshetnykmariya@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-5067-7728
Л.В. Шумлянський [2–4], д-р геол. наук, професор
E-mail: lshumlyanskyy@yahoo.com; https://orcid.org/0000-0002-6775-4419
Б. Марціняк-Малішевська [5], доктор
E-mail: b.maliszewska@uw.edu.pl; https://orcid.org/0000-0001-9147-6693
П. Йокубаускас 5, доктор
E-mail: p.jokubauskas@uw.edu.pl; https://orcid.org/0000-0002-1099-4497
Б. Багінський [5], професор
E-mail: b.baginski1@uw.edu.pl; https://orcid.org/0000-0002-5809-3452
Б. Дьюйм [6], доктор
E-mail: bruno.dhuime@umontpellier.fr; https://orcid.org/0000-0002-4146-4739
А. Гамслі [2], доктор
anna.salacinska@twarda.pan.pl; https://orcid.org/0000-0002-0889-3435
Д.Л. Старокадомський [3, 7], канд. хім. наук, старш. наук. співроб.
E-mail: km80@ukr.net; https://orcid.org/0000-0001-7361-663X
[1] Національний науково-природничий музей НАН України, м. Київ, Україна
[2] Інститут геологічних наук Польської академії наук, м. Варшава, Польща
[3] Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, м. Київ, Україна
[4] Університет Кертіна, м. Перт, Австралія
[5] Варшавський університет, Відділ геології, м. Варшава, Польща
[6] Університет Монпельє, м. Монпельє, Франція
[7] Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка НАН України, м. Київ, Україна
[8] Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

ХІМІЧНИЙ ТА ІЗОТОПНИЙ СКЛАД ФЛЮОРО-АПАТИТУ ІЗ СЕРЕДНІХ ІНТРУЗИВНИХ ПОРІД ГАЙСИНСЬКОГО БЛОКА УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА: СВІДЧЕННЯ ГЕТЕРОГЕННОСТІ ВИХІДНИХ РОЗПЛАВІВ

Вивчено хімічний склад, ізотопний склад стронцію, а також склад мінеральних включень у флюоро-апатиті з середніх інтрузивних порід Гайсинського комплекса Росинсько-Тікицького району Українського щита. Хімічний склад мінералу наближений до стехіометричного флюоро-апатиту. Значна негативна європієва аномалія і характер розподілу рідкісноземельних елементів (РЗЕ) типові для апатитів з високоглиноземистих (перглизоземистих) гранітів. У середньому вміст легких РЗЕ у флюоро-апатиті з діориту вищий, ніж з

Цитування: Решетник М.М., Шумлянський Л.В., Марціняк-Малішевська Б., Йокубаускас П., Багінський Б., Дьюйм Б., Гамслі А., Старокадомський Д.Л. Хімічний та ізотопний склад флюоро-апатиту із середніх інтрузивних порід Гайсинського блока Українського щита: свідчення гетерогенності вихідних розплавів. *Мінерал. журн.* 2025. **47**, № 4. С. 25—37. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.04.025

© 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/)

монцоніту. Натомість останні містять більше Cl, V, Mn, Y, а також середніх і важких РЗЕ. В апатитах наявні численні включення інших мінералів: кварцу, амфіболу, біотиту, калієвого польового шпату, плагіоклазу, монациту, карбонатів, магнетиту та графіту. За амфібол-плагіоклазовим термобарометром температура кристалізації включень у флюоро-апатиті становить 735—790 °С, а тиск — близько 2 кбар. Апатити з діориту вирізняються відносно сталим ізотопним складом стронцію та порівняно низьким відношенням $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,71027 ± 0,00047, тоді як в апатитах з монцонітів спостерігали значні його варіації з середнім значенням 0,71369 ± 0,00031. Досліджені зразки є складними утвореннями, мають ознаки як перглиноземистих гранітоїдів, так і порід тоналіт-трондьєміт-гранодіоритової асоціації. Розплав, з якого кристалізувався флюоро-апатит і включення в ньому, містив флюїдні компоненти, передусім воду та діоксид вуглецю. Між розплавами, з яких кристалізувались вивчені монцоніти і діорити, була відсутня ізотопна рівновага; діоритовий розплав містив дещо більше ювенільної компоненти, тоді як монцонітовий є продуктом плавлення давньої кори.

Ключові слова: *флюоро-апатит, рідкісноземельні елементи, Український щит, тоналіт-трондьєміт-гранодіоритова асоціація, діорит, монцоніт.*

Вступ. Породи гайсинського комплексу (так звані собіти) широко розповсюджені в зоні зчленування Росинсько-Тікицького та Дністровсько-Бузького районів Українського щита, де площа їх виходу становить понад 4 тис. км^2 (Shcherbakov, 2005). Вони містять численні ксеноліти метаморфічних порід амфіболітової та гранулітової фацій метаморфізму, зокрема амфіболіти, піроксен-амфіболові кристалосланці, кальцифіри, залізисті кварцити (Bartnytskyi et al., 1984; Stepanyuk et al., 2017). Як зазначали багато дослідників (Ryabokon et al., 1977; Shcherbakov, 2005; Stepanyuk et al., 2017), піроксенвмісні діорити і гранодіорити споріднені з чарнокітоїдами і належать до тоналіт-трондьєміт-гранодіоритової (ТТГ) асоціації, тоді як калішпатові гранітоїди гайсинського комплексу поступово переходять у граніти уманського комплексу. Ці породи мають принципово різне походження. Безкалішпатові чарнокітоїди зазвичай розглядають як продукти кристалізації магматичного розплаву, що утворився під час плавлення основних корових порід потовщеній континентальній корі (Martin, 1994; Moyen and Martin, 2012; Shumlyanskyy et al., 2021). Двопольовошпатові гранітоїди утворюються переважно у ході плавлення порід, збагачених на калій. Такими насамперед є корові біотитвмісні (мета)осадові породи.

Склад порід гайсинського комплексу варіює в межах кількох метрів від піроксенвмісних і кварцових діоритів та гранодіоритів до амфібол-біотитових і біотитових та аплітпегматоїдних гранітів (Ryabokon et al., 1977). З метою визначення їх походження ми виконали великий об'єм петрологічних та ізотопно-геохімічних досліджень (Reshetnyk et al., 2023, 2025), в ході яких було з'ясовано, що породи мають U-Pb вік за цирконом 2087 ± ±16 млн рр. За даними ізотопного складу гафнію в цирконах та неодиму в апатитах, джерелом вихідних розплавів "собітів" були давніші (мезоархейські) корові породи. Водночас значна кількість палеопротерозойських гранітоїдів у цьому регіоні мають ювенільні ізотопні характеристики (Lisna et al., 2023; Francovschi et al., 2024), які свідчать про їх виплавляння з молодих, на той час корових, порід. Деякі породи проявляють змішані ізотопні характеристики (Stepanyuk et al., 2025), що вказує на наявність в їх джерелі як ювенільних, так і давніших корових порід. Хімічний склад діоритів та гранодіоритів наближається до такого в давніших ТТГ асоціаціях району, хоча і має дещо підвищений вміст більшості некогерентних елементів. Монцоніти проявляють різке збагачення на найбільш несумісні великокатіонні літофільні елементи.

З огляду на широку розповсюдженість апатиту, його придатність до датування різними методами (U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd), можливість визначення ізотопного складу стронцію та кисню, а також індикаторні особливості хімічного складу, він став одним із найважливіших мінералів у ході петрологічних та металогенічних досліджень, зокрема найдавніших порід (Belousova et al., 2002; Duchesne et al., 2006; Kryvdik et al., 2011; Mao et al., 2016; Bruand et al., 2019; 2020; Antoine et al., 2020; O'Sullivan et al., 2020; Sun et al., 2021; Wang et al., 2022; Dubyna et al., 2022; Kieffer et al., 2024).

У цій роботі ми розглядаємо особливості хімічного та ізотопного складу апатиту з по-

рід гайсинського комплексу, а також наводимо відомості про склад включень в апатитах з монцонітів. Отримані дані використані з метою показати неоднорідність вихідних розплавів, а також їх можливе походження з різних джерел.

Петрографічний опис. Досліджені зразки (8-2078 та 19-2078) відібрані на природному відслоненні (48,928080 N, 29,192112 E) на північ від с. Ситківці на лівому березі струмка Городище (ліва притока р. Південного Бугу). Вони представлені гірськими породами масивної структури, середньо-крупнозернистими, місцями порфіровими, зеленувато-сірого кольору. За результатами петрографічного вивчення середній мінеральний склад зр. 8-2078, %: плагіоклаз — 30, калієвий польовий шпат — 45, кварц — 10, біотит — <1, клінопіроксен — 10, ортопіроксен — 5. Середній мінеральний склад зр. 19-2078, %: плагіоклаз — 75, калієвий польовий шпат — <5, кварц — 5, біотит — 3, рогова обманка — 1, клінопіроксен — 5, ортопіроксен — 7. Серед акцесорних мінералів присутні апатит, монацит, ксенотим, циркон. Рудні мінерали — пірит, халькопірит, піротин, магнетит. Вторинні мінерали представлені зеленою слюдою, сидеритом, доломітом, гідроксидами заліза. За співвідношенням породоутворювальних мінералів зр. 8-2078 має склад кварцового монцоніту, а зр. 19-2078 — кварцового діориту.

Структури двох досліджених зразків суттєво не відрізняються. За розмірами зерен структура порід найчастіше середньо- (1—5 мм), крупнозерниста (>5 мм), порфіроподібна. Найбільші розміри у досліджених породах мають, як правило, кристали плагіоклазу (від 1—2 до 10 мм і більше) та калієвого польового шпату (зр. 8-2078), розмір порфіроподібних кристалів якого може сягати 20 мм і більше. Кварц найчастіше трапляється у вигляді невеликих кристалів розміром від десятих міліметра до 2—3 мм. Темноколірні мінерали мають розмір 1—5 мм. Структура порід алотріоморфнозерниста, в якій усі світлі та темні мінерали неправильної форми; піроксени часто гіпідіоморфні. Ділянками структура гіпідіоморфнозерниста, що характеризується ідіоморфізмом плагіоклазу відносно інших породоутворювальних мінералів; також виявлено окремі гіпідіоморфні зерна біотиту та ортопіроксену на тлі ксеноморфнозернистої маси. Нерідко біотит розвивається у міжзерновому просторі інших породоутворювальних мінералів, де формує ксеноморфні виділення. Часто трапляються мірмекітові облямівки (зр. 8-2078), а також пойкілітові включення плагіоклазу в мікрокліні та навпаки, або включення плагіоклазу в біотиті. Окрім того, у досліджених породах наявна катакластична структура, проявлена у нерівномірному згасанні у схрещених ніколях породоутворювальних мінералів — кварцу, біотиту, плагіоклазу та калієвого польового шпату (Reshetnyk et al., 2020).

Методи досліджень. Флюоро-апатит виділено зі зразків гірських порід в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України (м. Київ) за стандартною методикою збагачення з використанням гравітаційного стола, важких рідин та магнітного сепаратора. Хімічний склад апатиту визначено за допомогою електронного мікроаналізатора *Cameca SX*100 (*EPMA*) у Лабораторії електронної мікроскопії, мікроаналізу та рентгенівської дифракції Варшавського університету. Для налаштування приладу, збору даних та початкових перерахунків використано програмне забезпечення *Cameca Peaksight* 5.1.

Дослідження включень у флюоро-апатиті проводили з використанням сканувального електронного мікроскопа *ZEISS Ultra Plus* у Центрі наук про Землю ім. Гельмгольца (*GFZ Helmholtz Centre for Geosciences*) в м. Потсдам (Німеччина). Прискорювальна напруга була встановлена на рівні 15 кВ.

Вміст мікроелементів у апатиті визначали в ізотопній лабораторії Триниті коледжу (*Trinity College*), м. Дублін, Ірландія. Використовували лазерну абляційну систему *Photon Machines Analyte Excite* 193 нм ArF, з'єднану з масспектрометром *Agilent* 7900. Як референтний матеріал для визначення вмісту мікроелементів використано стандартне скло *NIST* 612, а ізотоп ^{43}Ca — як внутрішній елементарний стандарт. Апатит *Durango*, охарактеризований за допомогою аналізу *ICP-MS* у розчині (Chew et al., 2016), використано як вторинний референтний матеріал.

Таблиця 1. **Хімічний склад флюоро-апатиту з монцоніту, зр. 8-2078, за даними електроннозондового аналізу, %**
Table 1. **Chemical composition of fluor-apatite from monzonite, sample 8-2078, according to the electron microprobe analysis, %**

Analysis #	F	Cl	H_2O	Na_2O	MgO	CaO	MnO	FeO	SrO	Y_2O_3	La_2O_3	Ce_2O_3	Pr_2O_3	Nd_2O_3	SiO_2	P_2O_5	Σ
1	2.68	0.40	0.36	0.02	0.02	54.68	0.06	0.05	0.03	0.17	0.02	0.20	0.02	0.18	0.28	42.02	99.98
2-1	2.60	0.35	0.39	0.03	0.01	53.64	0.08	0.12	0.03	0.15	0.03	0.15	0.06	0.13	0.24	41.91	98.75
2-2	2.75	0.36	0.31	0.09	0.01	53.44	0.09	0.07	0.04	0.15	0.07	0.29	0.04	0.25	0.40	41.74	98.87
3	2.51	0.26	0.44	0.09	0.01	53.42	0.08	0.20	0.04	0.24	0.06	0.22	0.06	0.19	0.35	40.97	98.02
4-1	2.56	0.36	0.40	0.05	0.02	54.08	0.04	0.16	0.02	0.08	0.04	0.11	0.01	0.09	0.01	41.76	98.63
4-2	2.51	0.38	0.41	0.08	0.01	53.33	0.07	0.18	0.04	0.20	0.05	0.27	0.04	0.28	0.44	41.11	98.27
4-3	2.57	0.40	0.38	0.04	0.01	53.43	0.04	0.15	0.04	0.30	0.05	0.22	0.02	0.23	0.36	41.17	98.25
4-4	2.59	0.36	0.40	0.05	0.00	53.52	0.07	0.13	0.05	0.22	0.03	0.16	0.00	0.00	1.00	41.44	98.87
5-1	2.48	0.30	0.47	0.05	0.01	54.10	0.05	0.08	0.04	0.22	0.10	0.34	0.09	0.29	0.49	41.63	99.61
5-2	2.48	0.28	0.49	0.07	0.02	54.37	0.06	0.05	0.03	0.10	0.05	0.22	0.04	0.17	0.19	42.18	99.70
5-3	2.68	0.31	0.38	0.06	0.01	54.48	0.08	0.08	0.02	0.07	0.04	0.18	0.03	0.15	0.20	42.10	99.68
6	2.62	0.31	0.41	0.08	0.02	54.38	0.07	0.06	0.05	0.16	0.07	0.22	0.04	0.21	0.22	42.09	99.85
7	2.51	0.46	0.42	0.07	0.02	53.92	0.05	0.17	0.04	0.20	0.08	0.32	0.05	0.31	0.41	42.05	99.91
8-1	2.49	0.44	0.43	0.06	0.02	54.23	0.08	0.12	0.01	0.20	0.04	0.14	0.05	0.14	0.25	41.88	99.43
8-2	2.53	0.45	0.41	0.07	0.01	54.47	0.05	0.09	0.03	0.11	0.01	0.09	0.03	0.10	0.13	42.17	99.59
9	2.37	0.49	0.47	0.07	0.02	53.85	0.08	0.05	0.03	0.28	0.05	0.23	0.04	0.24	0.38	41.78	99.32
10	2.83	0.31	0.30	0.03	0.00	54.32	0.08	0.10	0.01	0.19	0.02	0.14	0.05	0.20	0.28	41.91	99.52
11	2.52	0.24	0.47	0.08	0.00	54.13	0.06	0.07	0.02	0.35	0.05	0.18	0.02	0.24	0.38	41.73	99.43
12-1	2.74	0.32	0.32	0.05	0.02	53.63	0.06	0.09	0.04	0.39	0.06	0.23	0.05	0.27	0.56	41.16	98.80
12-2	2.68	0.27	0.38	0.08	0.01	54.13	0.08	0.04	0.02	0.16	0.01	0.15	0.04	0.14	0.15	41.93	99.08
13	2.60	0.40	0.40	0.04	0.01	54.58	0.06	0.06	0.02	0.21	0.00	0.04	0.01	0.08	0.20	42.34	99.86
14-1	2.56	0.32	0.43	0.05	0.01	54.57	0.05	0.03	0.01	0.29	0.02	0.05	0.00	0.09	0.21	42.15	99.71
14-2	2.79	0.37	0.31	0.04	0.00	54.29	0.06	0.08	0.02	0.37	0.02	0.06	0.01	0.10	0.30	42.14	99.69
15-1	2.76	0.19	0.37	0.05	0.00	54.08	0.05	0.11	0.04	0.26	0.01	0.12	0.05	0.16	0.33	41.95	99.33
15-2	2.73	0.18	0.36	0.04	0.04	54.33	0.04	0.24	0.02	0.16	0.03	0.08	0.03	0.12	0.35	40.85	98.42

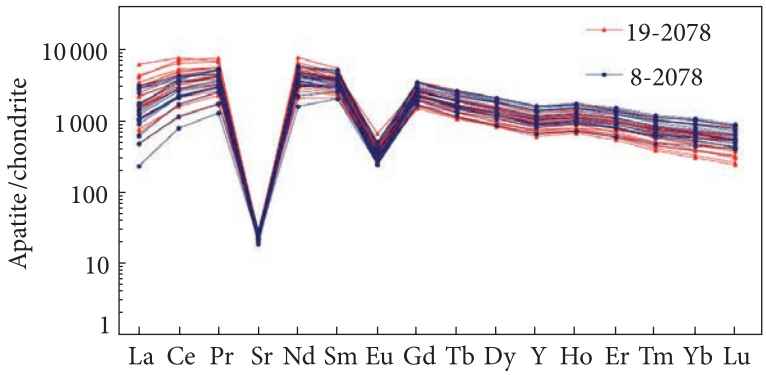


Рис. 1. Розподіл рідкісноземельних елементів, Y та Sr (McDonough and Sun, 1995) у флюоро-апатиті із зр. 8-2078, 19-2078

Fig. 1. Chondrite-normalised (McDonough and Sun, 1995) REY + Sr multi-element plots for fluor-apatite from samples 8-2078, 19-2078

Ізотопний склад стронцію в апатиті визначали в лабораторії *MILESTONE* (*Géosciences Montpellier*) Університету Монпельє (*Université de Montpellier*), м. Монпельє (Франція) за допомогою масспектрометра *Thermo Scientific Neptune XT MC-ICP-MS*, поєднаного з ексимерним лазером *Teledyne Cetac Analyte Excite+*. Деталі аналітичної процедури наведено в роботі (Buzenchi et al., 2024).

Результати. Апатит в обох досліджених породах утворює призматичні та короткопризматичні кристали із заокругленими ребрами, переважно у вигляді включень у калієвому польовому шпаті, рідше — в інших породоутворювальних мінералах.

Хімічний склад апатиту. Склад флюоро-апатиту з монцоніту (зр. 8-2078) наближається до стехіометричного, %: F — 2,4—2,8; Cl — 0,2—0,5; H_2O — 0,3—0,5; SiO_2 — 0,2—0,4; Y_2O_3, Ce_2O_3, Nd_2O_3 — по 0,2; FeO — 0,1 (табл. 1).

За даними *LA-ICP-MS*, флюоро-апатит із "собітів" містить мало Sr (до 200 ppm) та помірну кількість Y (1000—2000 ppm); вміст рідкісноземельних елементів (РЗЕ) варіює від 2500 до 12000 ppm (середнє — 6400 ppm) (табл. 2). На ділянці легких РЗЕ, від La до Sm, спостерігають помітні варіації їх вмісту і загальне невелике зростання концентрацій у напрямку важких РЗЕ (рис. 1). Значна негативна європієва аномалія і весь графік у цілому подібні до таких для апатитів із високоглиноземистих (перглиноземистих) гранітів (Bea, 1996). Починаючи з Gd, вміст РЗЕ поступово знижується, водночас варіації його значень є відносно невеликими. У середньому вміст легких РЗЕ у флюоро-апатиті з діориту вищий, ніж у флюоро-апатиті з монцоніту, що знаходить відображення у дещо більшому коефіцієнті фракціонування $(La/Yb)_N$ — 4,7 проти 2,1 відповідно. Натомість апатити з монцонітів містять більше Cl, V, Mn, Y, а також середніх та важких РЗЕ.

За розподілом хондрит-нормованих концентрацій рідкісних елементів, Y та Sr зразки найкраще відповідають гранітам *I*-типу (O'Sullivan et al., 2020). Аналітичні точки хімічного складу досліджених флюоро-апатитів, нанесені на дискримінаційні діаграми, потрапляють у їх різні ділянки: 1) Laurent et al. (2017) — частково до сильно перглиноземистих корових гранітів *S*-типу та здебільшого метаглиноземистих та слабо перглиноземистих гранітоїдів *I*-типу (рис. 2, *a*); 2) Bruand et al. (2020) — перглиноземистих магм гранітоїдів *S*-типу і частково *I*-типу (рис. 2, *b*); 3) Antoine et al. (2020) — післяархейських перглиноземистих гранітоїдів, але поблизу поля ТТГ асоціації (рис. 2, *c*); 4) Kieffer et al. (2024) — неподалік від ТТГ, але в полях різноманітних гранітоїдів; 5) O'Sullivan et al. (2020) — на межу поля апатитів із порід високих ступенів метаморфізму і порід середнього та низького ступеня метаморфізму (рис. 2, *d*).

Включення в апатитах. Апатити з монцоніту містять численні включення інших мінералів, серед яких діагностовано кварц, амфібол, біотит, калієвий польовий шпат, плагіоклаз, монацит, карбонати Ca, Fe, Mn та Mg, магнетит і графіт (рис. 3).

Одним із найрозповсюдженіших включень є монацит, який утворює численні дрібні кристали від ізометричних до різко витягнутих, голкоподібних (у перетині). В останньому випадку кристали закономірно орієнтовані в одному напрямку (рис. 3). Карбонати також широко розповсюджені і репрезенто-

Таблиця 2. **Хімічний склад флюоро-апатиту за даними *LA-ICP-MS*, ppm**
Table 2. **Chemical composition of fluor-apatite according to LA-ICP-MS data, ppm**

Element	Analysis #											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13
	Sample 19-2078, diorite											
Cl	4554	11539	7064	9510	3003	9232	5314	11122	9322	7485	4267	6501
V	2	6	4	2	1	4	3	2	1	1	1	1
Mn	264	320	234	285	254	342	293	285	323	324	299	257
Sr	196	176	176	200	162	204	201	198	198	178	165	164
Y	1477	1942	1558	1679	997	1101	1966	2452	921	1673	1289	987
Zr	2	2	2	1	0	1	2	3	0	2	1	1
La	154	953	651	386	111	690	689	347	257	367	365	176
Ce	1010	4213	2644	2011	672	2581	2946	1847	1265	1855	1630	947
Pr	225	681	459	374	154	408	497	393	237	378	301	204
Nd	1354	3424	2238	2015	920	1922	2568	2251	1311	2089	1588	1182
Sm	426	776	490	556	297	445	640	727	348	580	414	327
Eu	20	21	19	20	17	13	36	27	18	22	26	17
Gd	417	659	434	513	287	364	549	685	309	508	375	309
Tb	55	82	56	65	37	45	71	94	40	65	47	39
Dy	298	420	313	344	203	232	384	499	197	331	251	201
Ho	56	74	59	63	39	41	72	92	35	63	47	37
Er	143	173	154	151	98	98	189	225	84	155	123	91
Tm	19	20	19	18	12	11	24	27	9	19	15	11
Yb	109	105	114	101	72	60	142	157	47	110	91	59
Lu	15	13	15	13	10	7	19	20	6	14	13	8
Pb	15	16	10	15	9	9	18	18	9	14	10	7

Element	Analysis #											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Sample 8-2078, monzonite											
Cl	7675	11685	12730	13387	5984	7224	9409	7877	8829	10483	10369	11185
V	0	2	3	1	2	3	2	5	2	2	4	3
Mn	422	575	331	436	441	481	744	739	416	468	793	361
Sr	132	181	143	197	210	187	180	176	158	158	193	189
Y	1534	2116	1425	2137	1385	2432	2082	2459	1006	1306	2315	1595
Zr	1	3	1	2	1	1	1	1	0	0	1	1
La	207	244	282	238	110	384	378	407	661	715	325	568
Ce	1281	1331	1546	1333	692	2241	2290	2016	2169	2506	1709	2457
Pr	267	272	284	275	157	454	472	368	333	397	323	479
Nd	1404	1534	1507	1606	988	2418	2538	2025	1651	1874	1848	2159
Sm	447	504	429	559	364	728	733	684	374	475	622	529
Eu	17	19	14	18	13	19	23	28	13	16	26	15
Gd	443	518	411	570	368	667	659	661	329	424	604	442
Tb	59	74	56	78	50	90	86	91	40	54	87	58
Dy	317	428	299	437	282	490	445	503	207	279	464	314
Ho	58	79	54	81	53	87	80	92	38	49	87	58
Er	136	210	136	206	137	214	193	237	93	123	221	148
Tm	16	27	16	25	16	25	22	29	11	15	27	18
Yb	84	158	89	142	97	137	125	167	69	90	159	103
Lu	10	20	12	19	13	17	16	21	10	12	20	13
Pb	14	21	17	37	14	27	31	29	13	20	29	16

14	15	16	17	18	19	20
5842	8259	8490	7570	5784	5015	6717
1	6	2	3	4	1	3
259	320	293	293	286	274	283
157	198	170	170	186	160	174
1148	1580	1392	1343	1047	1627	1222
1	1	0	1	5	1	2
343	1008	502	795	1432	518	695
1670	3851	2104	3149	4535	2127	2870
291	605	383	496	617	389	497
1489	2912	1953	2318	2762	2082	2357
355	652	499	526	523	575	532
23	22	14	17	23	28	19
313	535	469	454	392	515	435
40	65	57	55	46	66	51
213	337	297	280	226	342	266
42	60	54	50	39	63	47
113	148	125	120	91	150	107
15	17	14	14	10	17	12
91	93	73	76	51	100	62
13	11	9	9	6	13	8
14	17	13	9	6	11	8

14	15	16	17	19	20
9470	11763	13183	13843	15652	6687
3	50	2	1	3	2
660	577	443	877	545	737
191	152	140	161	167	160
1351	1218	1774	1725	1805	2069
1	1	2	0	2	1
233	54	142	653	305	237
1252	467	1018	2440	1685	1318
262	116	229	407	324	272
1381	706	1363	1936	1764	1741
411	290	473	533	532	577
15	13	20	16	16	25
388	317	485	483	501	554
52	46	68	66	68	80
279	254	368	356	364	432
51	48	67	66	68	77
126	123	168	162	169	194
14	14	21	19	20	24
81	82	117	105	108	140
10	10	15	13	14	18
16	12	16	16	31	24

вані такими головними відмінами: кальцит, сидероплезит (магнезіальний сидерит) та анкерит. Кальцит постійно містить домішку MnO (від 1 до 5 %); сидероплезит — значну кількість MgO (12—14 %), а також домішки MnO (~1 %) та CaO (1—3 %); анкерит — MgO (до 16 %), FeO (8—9 %), MnO (~1 %).

Кварц та магнетит зазвичай утворюють дрібні ізометричні кристали розміром до декількох мікрометрів. Польові шпати трапляються переважно у складі доволі великих (до 25—30 μm) полімінеральних агрегатів. Калієві польові шпати містять від 3 до 10 % альбітового компонента, тоді як плагіоклази належать до кислих андезинів ($Ab_{65—67}An_{33—35}$). Біотит має залізистість f = 0,42—0,47 та містить 2,0—3,7 % TiO_2. Температура кристалізації біотиту, розрахована за (Luhr et al., 1984), становить 630—700 °C. Амфіболи належать до низькокальцієвих магнезіально-залізистих відмін (антофіліт-жедрит); містять 45—47 % SiO_2, 7—8 Al_2O_3, 25—30 Fe_2O_3,

Таблиця 3. **Ізотопний склад стронцію в апатиті за даними *LA-ICP-MS***

Table 3. **Sr isotopic composition in apatite based on the LA-ICP-MS data**

Analysis #	$^{87}Sr/^{86}Sr$	2 SE
Sample 19-2078, diorite		
1	0.710707	0.000352
2	0.710391	0.000313
3	0.710249	0.000326
4	0.710256	0.000324
5	0.710208	0.000349
6	0.710104	0.000299
7	0.709977	0.000337
Average, 7/7	*0.71027*	*0.00047*
Sample 8-2078, monzonite		
1	0.713798	0.000299
2	0.713549	0.000377
3*	0.712288	0.000298
4*	0.712931	0.000335
5	0.713606	0.000330
6	0.713908	0.000325
7	0.713588	0.000380
Average, 5/7	*0.71369*	*0.00031*

Примітка. Зірочкою позначено аналізи, результати яких вилучено із розрахунку середнього значення.

Note. An asterisk indicates analyses that were not taken into account when calculating the mean value.

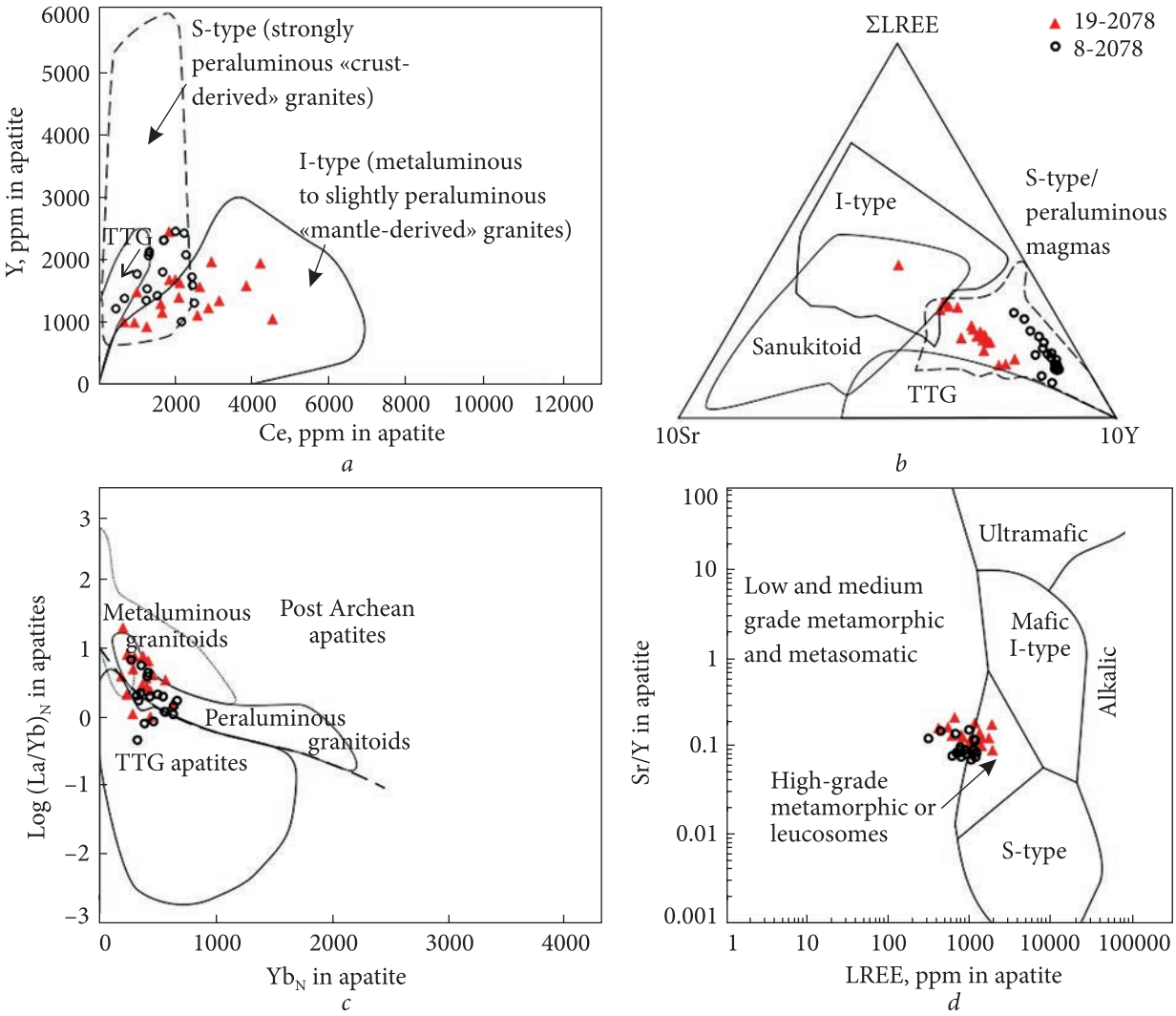


Рис. 2. Хімічний склад флюоро-апатиту, зр. 8-2078 та 19-2078, на дискримінаційній діаграмі: *a* — Laurent et al. (2017); *b* — Bruand et al. (2020); *c* — Antoine et al. (2020); *d* — O'Sullivan et al. (2020)

Fig. 2. Fluor-apatite chemical composition data for samples 8-2078 and 19-2078 plotted on diagrams: *a* — Laurent et al. (2017); *b* — Bruand et al. (2020); *c* — Antoine et al. (2020); *d* — O'Sullivan et al. (2020)

15—16 MgO, 2,1—3,5 % CaO. Тиск під час кристалізації амфіболу за численними барометрами, що базуються на вмісті Al_2O_3 (розраховані за допомогою макросу *MagMin_PT* (Gündüz and Asan, 2023)), варіює в межах 2—3,5 кбар, що відповідає глибинам 7—15 км. За амфібол-плагіоклазовим термобарометром (Blundy and Holland, 1990), температура кристалізації становить 735—790 °C, а тиск — близько 2 кбар. Графіт було виявлено як дрібне включення в плагіоклазі, що разом з іншими мінералами утворювало агрегатне включення в апатиті (рис. 3).

Окрім мономінеральних включень іноді трапляються полімінеральні агрегати, які є результатом кристалізації захопленого розплаву. На рис. 3 наведено приклади досліджених нами полімінеральних включень. Перше (рис. 3, *a*) складене видовженим кристалом кварцу розміром 30 × 13 μm, зрощеним із зернами калієвого польового шпату, амфіболу, карбонату і монациту неправильної форми розміром до 10 × 15 μm. Друге включення — агрегат кристалів біотиту, калієвого польового шпату, плагіоклазу, кварцу та графіту розміром до 35 × 25 μm.

Ізотопний склад стронцію в апатиті. Ізотопний склад стронцію визначали в семи кристалах апатиту в кожній із проб (табл. 3, рис. 4). Апатити з діориту відрізняються відносно сталим ізотопним складом стронцію та порівняно низьким відношенням $^{87}Sr/^{86}Sr$

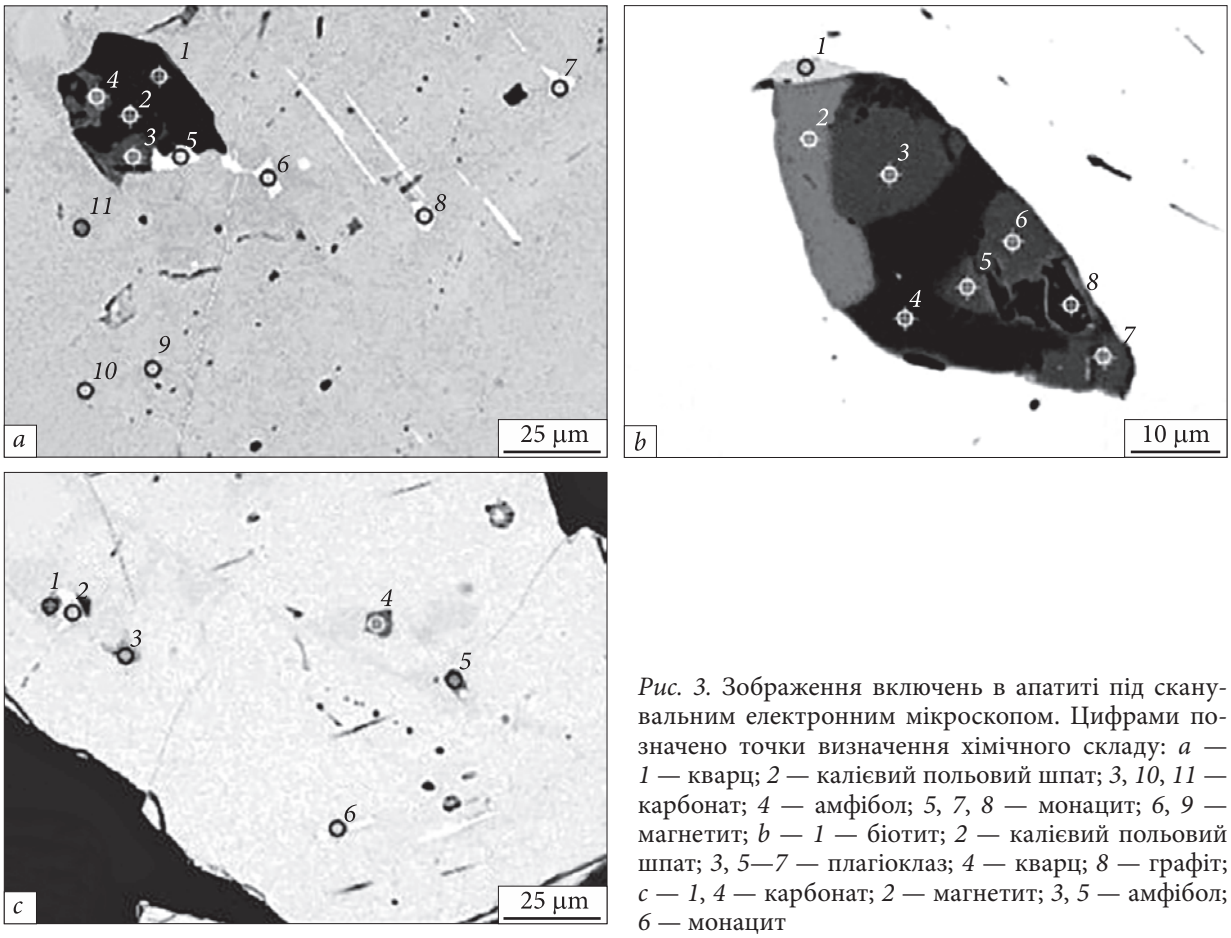
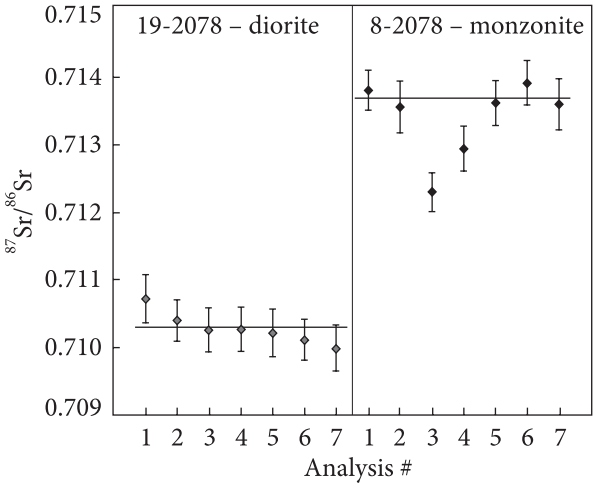


Рис. 3. Зображення включень в апатиті під сканувальним електронним мікроскопом. Цифрами позначено точки визначення хімічного складу: *a* — *1* — кварц; *2* — калієвий польовий шпат; *3*, *10*, *11* — карбонат; *4* — амфібол; *5*, *7*, *8* — монацит; *6*, *9* — магнетит; *b* — *1* — біотит; *2* — калієвий польовий шпат; *3*, *5*—*7* — плагіоклаз; *4* — кварц; *8* — графіт; *c* — *1*, *4* — карбонат; *2* — магнетит; *3*, *5* — амфібол; *6* — монацит

Fig. 3. Images of inclusions in apatite as observed under a scanning electron microscope. Points for determining the chemical composition: *a* — *1* — quartz; *2* — K-feldspar; *3*, *10*, *11* — carbonate; *4* — amphibole; *5*, *7*, *8* — monazite; *6*, *9* — magnetite; *b* — *1* — biotite; *2* — K-feldspar; *3*, *5*—*7* — plagioclase; *4* — quartz; *8* — graphite; *c* — *1*, *4* — carbonate; *2* — magnetite; *3*, *5* — amphibole; *6* — monazite

Рис. 4. Варіації ізотопного складу стронцію в апатитах із середніх порід с. Ситківці. Ан. № 3, 4 у зр. 8-2078 вилучено із розрахунку середнього ізотопного складу

Fig. 4. Variations in the Sr isotopic composition of apatites from intermediate rocks of the village of Sytkivtsi. Analyses # 3 and 4 from sample 8-2078 were excluded from the calculation of the average isotopic composition



(середнє за сімома вимірами 0,71027 ± ± 0,00047), тоді як в апатитах з монцонітів спостерігали значні варіації відношення — від 0,71229 до 0,71391, що значно виходять за межі аналітичної похибки. Середнє значення за п'ятьма вимірами становить 0,71369 ± ± 0,00031, що суттєво вище, ніж в апатитах з діоритів.

Обговорення. Апатит, як один із найрозповсюдженіших акцесорних мінералів у магматичних породах різного складу, широко використовують у петрологічних дослідженнях. Різні автори розробили велику кількість класифікаційних діаграм апатитів для визначення типів гірських порід, з яких вони походять, металогенічної спеціалізації граніто-

їдів тощо. Втім до них, як і до всіх класифікаційних діаграм такого типу, слід ставитись обережно, не абсолютизуючи їхнє значення.

На більшості діаграм досліджені апатити потрапляють у поле гранітів *S*-типу, або перглиноземистих гранітів, указуючи на значну роль супракрустального (осадового) компонента в їх генезисі. Однак між апатитами з монцонітів і діоритів існує певна відмінність — останні частково потрапляють у поле гранітів *I*-типу, що підкреслює роль мантійного (ювенільного) матеріалу в їх складі. Слід також зазначити, що фігуративні точки апатитів з обох досліджених порід розташовуються поблизу поля ТТГ асоціації. Водночас на класифікаційні діаграмі O'Sullivan et al. (2020) (рис. 2, *d*) апатити з досліджених порід потрапляють на межу між полями апатитів з високометаморфізованих порід і порід середньої та низької фацій метаморфізму. Отже, за хімічним складом апатити із "собітів" мають ознаки як перглиноземистих гранітоїдів, так і порід ТТГ серії та метаморфічних порід. Виявлено також відмінність у складі апатитів із монцонітів та діоритів.

Зауважимо, що на дискримінаційних діаграмах, запропонованих Belousova et al. (2002), циркони із "собітів" потрапляють у зону перекриття між гранітоїдами і основними породами, що характерно для порід ТТГ асоціації.

Також слід зазначити, що за валовим хімічним складом (Reshetnyk et al., 2023) досліджені породи належать до перглиноземистих із різким переважанням Al_2O_3 над CaO, Na_2O й K_2O. Водночас, за особливостями мінерального складу, "собіти" відповідають магматичним породам *I*-типу: в них відсутні високоглиноземисті мінерали — мусковіт, гранат, кордієрит, силіманіт тощо. Темноколірні мінерали представлені біотитом, амфіболами, піроксенами. Таку суперечливість між хімічним та мінеральним складами ми пояснюємо утворенням вихідних розплавів унаслідок плавлення давнього нижньокорового матеріалу первинно магматичного (а не осадового) походження.

Відмінність між апатитами з монцонітів (зр. 8-2078) та діоритів (зр. 19-2078) проявлена також в ізотопному складі стронцію. Значення $^{87}Sr/^{86}Sr$ є суттєво вищим у перших, ніж у других (0,71369 ± 31 та 0,71027 ± ± 47 відповідно). Водночас окремі з проаналізованих кристалів апатиту з монцонітів мають нижче ізотопне відношення $^{87}Sr/^{86}Sr$, ніж решта кристалів у зразку (рис. 4, табл. 3). Обидва значення свідчать про тривалу корову передісторію порід, за рахунок плавлення яких утворились вихідні для монцонітів та діоритів розплави. Такими породами могли бути як еоархейська асоціація ендербітів та основно-ультраосновних гранулітів гайворонського комплексу (Lesnaya, 1988; Shumlyanskyy et al., 2021; Claesson et al., 2019), так і ТТГ асоціації мезо-неоархейського літинського комплексу (Stepanyuk et al., 2020, 2021). Водночас отримані дані щодо ізотопного складу стронцію свідчать про відсутність ізотопної рівноваги між розплавами, з яких кристалізувались монцоніти та діорити. Всупереч своєму близькому розташуванню, дві гірські породи різко відрізняються як за мінеральним складом, так і за ізотопним, і, очевидно, кристалізувались із двох незалежних розплавів. Діоритовий містив дещо більше ювенільної компоненти, тоді як монцонітовий є продуктом плавлення давньої кори, про що також свідчать ізотопний склад неодиму в апатиті (Reshetnyk et al., 2023) та гафнію в цирконі (Reshetnyk et al., 2025). Наявність у монцоніті апатитів з дещо нижчим ізотопним відношенням $^{87}Sr/^{86}Sr$, ніж у більшості кристалів, свідчить про неоднорідність цього розплаву на мікрорівні.

Наявність в апатитах з монцонітів включень амфіболів, графіту та карбонатів свідчить, що розплав, з якого кристалізувався апатит, містив флюїдні компоненти, передусім воду та діоксид вуглецю.

Висновки. Досліджені апатити з порід собітового комплексу Росинсько-Тікицького району мають хімічний склад, який указує, що ці породи є комплексними утвореннями, мають ознаки як перглиноземистих гранітоїдів, так і порід ТТГ серії та метаморфічних порід. Наявність амфіболів, графіту та карбонатів у вигляді включень в апатиті свідчить, що розплав містив флюїдні компоненти, передусім воду та діоксид вуглецю.

Дані щодо ізотопного складу стронцію вказують на відсутність ізотопної рівноваги між розплавами, з яких кристалізувались

монцоніти та діорити. Ці гірські породи різко відрізняються і за мінеральним складом, і за ізотопним, тобто кристалізувались із двох незалежних розплавів. Діоритовий розплав містив дещо більше ювенільної компоненти, тоді як монцонітовий є переважно продуктом плавлення давньої кори.

Автори присвячують цю роботу героїчним зусиллям Збройних сил України та стійкості і мужності українського народу. Це дослідження є частиною проєкту № 2021/43/P/ST10/02283 за співфінансування Національного наукового центру Польщі і рамкової програми Європейського Союзу досліджень та інновацій "Горизонт 2020" за грантом програми Марії Склодовської-Кюрі, договір № 945339. Автори також вдячні д-ру геол.-мін. наук С.Г. Кривдіку та д-ру геол. наук О.В. Митрохину за корисні та слушні зауваження до тексту статті.

REFERENCES / ЛІТЕРАТУРА

Antoine, C., Bruand, E., Guitreau, M. and Devidal, J.-L. (2020), *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol. 21, Iss. 7. https://doi.org/10.1029/2020GC008923

Bartnytskyi, E.N., Golub, E.N., Horlytskyi, B.A., Esypchuk, K.E., Zabiyaka, L.I., Kirillov, S.P., Orsa, V.I., Osadchyi, V.K., Usenko, I.S., Tsarovsky, I.D. and Shcherbakov, I.B. (1984), *Granitoid formations of the Ukrainian Shield*, Nauk. dumka, Kyiv [in Russian].

[Бартницкий, Е.Н., Голуб, Е.Н., Горлицкий, Б.А., Есипчук, К.Е., Забияка, Л.И., Кириллов, С.П., Орса, В.И., Осадчий, В.К., Усенко, И.С., Царовский, И.Д., Щербаков, И.Б. (1984), *Гранитоидные формации Украинского щита*. Київ: Наук. думка.]

Bea, F. (1996), J. *Petrology*, Vol. 37(3), pp. 521-552. https://doi.org/10.1093/petrology/37.3.521

Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y. and Fischer, N.I. (2002), *J. Geochem. Explor.*, Vol. 76, pp. 45-69. https://doi.org/10.1016/S0375- 6742(02)00204-2

Blundy, J.D. and Holland, T.J.B. (1990), *Contr. Mineral. and Petrol.*, Vol. 104, pp. 208-224. https://doi.org/10.1007/BF00306444

Bruand, E., Fowler, M., Storey, C., Laurent, O., Antoine, C., Guitreau, M., Heilimo, E. and Nebel, O. (2020), *Geochem. Perspect. Lett.*, Vol. 13, pp. 7-12. https:// doi.org/10.7185/geochemlet.2006

Bruand, E., Storey, C., Fowler, M. and Heilimo, E. (2019), *Geochim. et Cosmochim. acta*, Vol. 255, pp. 144-162. https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.04.002

Buzenchi, A., Moreira, H., Bruand, E., Bruguier, O. and Dhuime, B. (2024), *Chem. Geol.*, Vol. 666, 122306. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122306

Chew, D.M., Babechuk, M.G., Cogné, N., Mark, C., O'Sullivan, G.J., Henrichs, I.A., Doepke, D. and McKenna, C.A. (2016), *Chem. Geol.*, Vol. 435, pp. 35-48. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.03.028

Claesson, S., Artemenko, G., Bogdanova, S. and Shumlyanskyy, L. (2019), *Archean crustal evolution in the Ukrainian Shield*, in: *Earth's oldest rocks*, second ed., in Martin, J. van Kranendonk, Vickie Bennett, Elis, Hoffmann (eds), Elsevier, pp. 837-854. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63901-1.00033-2

Dubyna, O.V., Kryvdik, S.G., Shvaika, I.A., Shvaika, I.D. and Proskurka, L.I. (2022), *Mineral. Journ.* (*Ukraine*), Vol. 44, No. 3, pp. 48-66 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.03.048

[Дубина, О.В., Кривдік, С.Г., Швайка, І.А., Швайка, І.Д., Проскурка, Л.І. (2022), *Мінерал. журн.* **44**, № 3. С. 48—66.]

Duchesne, J.C., Shumlyanskyy, L. and Charlier, B. (2006), *Lithos*, Vol. 89 (3-4), pp. 353-376. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.01.003

Francovschi, I., Shumlyanskyy, L., Grytsenko, V. and Hoffmann, A., Wilde, S.A. and Bekker, A. (2024), *Precam. Res.*, Vol. 413, 107572. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107572

Gündüz, M. and Asan, K. (2023), *Mineral. Mag.*, Vol. 87, pp. 1-9. https://doi.org/10.1180/mgm.2022.113

Kieffer, M.A., Dare, S.A.S. and Gendron, M. (2024), *Chem. Geol.*, Vol. 649, 121965. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.121965

Kryvdik, S.G., Dubyna, O.V., Dovbush, T.I., Kotvytska, I.M., Vysotsky, O.B., Bezsmolova, N.V. and Amashukeli, Yu.A. (2011), *Mineral. Journ.* (*Ukraine*), Vol. 33, No. 3, Kyiv, pp. 55-62 [in Ukrainian].

[Кривдік, С.Г., Дубина, О.В., Довбуш, Т.І., Котвицька, І.М., Висоцький, О.Б., Безсмолова, Н.В., Амашукелі, Ю.А. (2011), *Мінерал. журн.* **33**, № 3. С. 55—62.]

Laurent, O., Zeh, A., Gerdes, A., Villaros, A., Gros, K. and Słaby, E. (2017), *Contrib. Mineral. Petrol.*, Vol. 172, 80. https://doi.org/10.1007/s00410-017-1398-1

Lesnaya, I.M. (1988), *Geochronology of charnockites of the Bouh area*, Nauk. dumka, Kyiv [in Russian].

[Лесная, И.М. (1988), *Геохронология чарнокитов Побужья*. Киев: Наук. думка.]

Lisna, I.M., Ponomarenko, A.N., Shumlyanskyy, L.V., Larikov, A.L., Somka, L.V., Hulko, V.V. and Kovalenko, O.O.

(2023), *Mineral. Journ*. (*Ukraine*), Vol. 45, No. 2, Kyiv, pp. 99-115 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.02.099

[Лісна, І.М., Пономаренко, О.М., Шумлянський, Л.В., Ларіков, А.Л., Сьомка, Л.В., Гулько, В.В., Коваленко, О.О. (2023), *Мінерал. журн*. **45**, № 2. С. 99—115.]

Luhr, L.F., Carmichael, I.S.E. and Varekamp, J.C. (1984), *J. Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 23, pp. 69-108. https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90057-X

Martin, H. (1994), *Develop. Precambr. Geol*., Vol. 11, pp. 205-259. https://doi.org/10.1016/S0166-2635(08)70224-X

Mao, M., Rukhlov, A.S., Rowins, S.M., Spence, J. and Coogan, L.A. (2016), *Econ. Geol*., Vol. 111 (5), pp. 1187-1222. https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1187

McDonough, W.F. and Sun, S. (1995), *Chem. Geol.*, Vol. 120 (3-4), pp. 223-253. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4

Moyen, J.-F. and Martin, H. (2012), *Lithos*, Vol. 148, pp. 312-336. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010

O'Sullivan, G., Chew, D., Kenny, G., Henrichs, I. and Mulligan, D. (2020), *Earth Sci. Rev.*, Vol. 201, 103044. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103044

Reshetnyk, M., Andreyev, O. and Zayats, O. (2020), *Precambrian: rock associations and their ore-bearing capacity. Coll. abstr. Int. sci. conf*., Septem. 22-24, 2020, Kyiv, pp. 97-99 [in Ukrainian].

[Решетник, М., Андреєв, О., Заяць, О. (2020), *Докембрій: породні асоціації та їхня рудоносність. Зб. тез Міжнар. наук. конф*., 22-24 верес. 2020 р. Київ. С. 97—99.]

Reshetnyk, M., Zaiats, O., Shumlyanskyy, L. Starokadomsky, D. and Stepanyuk, L. (2023), *Acta Geochim*., Vol. 42, pp. 393-408. https://doi.org/10.1007/s11631-022-00590-7

Reshetnyk, M.M., Shumlyanskyy, L.V., Chew, D., Dhuime, B. and Vudarska, A. (2025), *Mineral. Journ*. (*Ukraine*), Vol. 47, No. 3, pp. 55-68 [in Ukranian]. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.03.055

[Решетник, М.М., Шумлянський, Л.В., Чью, Д., Дьюйм, Б., Вударська, А. (2025), *Мінерал. журн*. **47**, № 3. С. 55—68.]

Ryabokon, V.V. and Shcherbakov, I.B. (1977), *Sobites of the Ukrainian Shield and their origin*, Prepr. IGMR UkrSSR Acad. Sci., Kyiv [in Russian].

[Рябоконь, В., Щербаков, И. (1977), *Собиты Украинского щита и их генезис*. Киев: Препр. ИГМР АН УССР.]

Shcherbakov, I.B. (2005), *Petrology of the Ukrainian Shield*, PH "Western Ukr. Consulting Center", Lvov, 366 p. [in Russian].

[Щербаков, И.Б. (2005), *Петрология Украинского щита*. Изд-во "Западн. Укр. консалтинг. центр", Львов. 366 с.]

Shumlyanskyy, L., Wilde, S.A., Nemchin, A.A., Claesson, S., Billström, K. and Bagiński, B. (2021), *Precam. Res*., Vol. 352, 106001. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106001

Stepanyuk, L.M., Bukhareva, K.S., Kurylo, S.I., Dovbush, T.I., Zyulzle, O.V. (2017), *Mineral Resources Ukraine*, No. 4, Kyiv, pp. 3-6 [in Ukrainian].

[Степанюк, Л.М., Бухарєва, К.С., Курило, С.І., Довбуш, Т.І., Зюльцле, О.В. (2017), *Мінерал. ресурси України*. № 4. С. 3—6.]

Stepanyuk, L.M., Shumlyanskyy, L.V., Gatsenko, V.O., Lisna, I.M., Dovbush, T.I., Wilde, S.A., Nemchin, A.A., Bagiński, B. and Bilan, O.V. (2020), *Mineral. Journ.* (*Ukraine*), Vol. 42, No. 3, pp. 50-68 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.42.03.050

[Степанюк, Л.М., Шумлянський, Л.В., Гаценко, В.О., Лісна, І.М., Довбуш, Т.І., Вайлд, С.А., Немчин, А.А., Багински, Б., Білан, О.В. (2020), *Мінерал. журн*. **42**, № 3. С. 50—68.]

Stepanyuk, L.M., Shumlyanskyy, L.V., Kurylo, S.I., Syomka, V.O., Bondarenko, S.M., Wilde, S.A. and Nemchin, A.A. (2021), *Mineral. Journ. (Ukraine),* Vol. 43, No. 1, Kyiv, pp. 34-50 [in Ukrainian], https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.01.034

[Степанюк, Л.М., Шумлянський, Л.В., Курило, С.І., Сьомка, В.О., Бондаренко, С.М., Вайлд, С.А., Немчин, А.А. (2021), *Мінерал. журн.* **43**, № 1. С. 34—50.]

Stepanyuk, L.M., Shumlyanskyy, L.V., Chew, D. and Dhuime, B. (2025), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 47, No. 2, Kyiv, pp. 89-101 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.47.02.089

[Степанюк, Л.М., Шумлянський, Л.В., Чью, Д., Дьюйм, Б. (2025), *Мінерал. журн*. **47**, № 2. С. 89—101.]

Sun, J.F., Yang, J.H., Zhang, J.H., Yang, Y.H. and Zhu, Y.S. (2021), *Chem. Geol.*, Vol. 566, 120104. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120104

Wang, H., Cai, K., Sun, M., Xia, X.P., Lai, C.K., Li, P., Wan, B. and Zhang, Z. (2022), *Lithos*, Vol. 422-423, 106749. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106749

Received 07.06.2025

M.M. Reshetnyk [1, 8], PhD, Senior Researcher
E-mail: reshetnykmariya@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-5067-7728
L.V. Shumlyanskyy [2—4], DrSc, Professor
E-mail: lshumlyanskyy@yahoo.com; https://orcid.org/0000-0002-6775-4419
B. Marciniak-Maliszewska [5], Dr.
E-mail: b.maliszewska@uw.edu.pl; https://orcid.org/0000-0001-9147-6693
P. Jokubauskas [5], Dr.
E-mail: p.jokubauskas@uw.edu.pl; https://orcid.org/0000-0002-1099-4497
B. Bagiński [5], Professor
E-mail: b.baginski1@uw.edu.pl; https://orcid.org/0000-0002-5809-3452
B. Dhuime [6], PhD
E-mail: bruno.dhuime@umontpellier.fr; https://orcid.org/0000-0002-4146-4739
A. Gumsley [2], Dr.
E-mail: anna.salacinska@twarda.pan.pl; https://orcid.org/0000-0002-0889-3435
D.L. Starokadomsky [3, 7], PhD, Senior Researcher
E-mail: km80@ukr.net; https://orcid.org/0000-0001-7361-663X
[1] National Museum of Natural History of the NAS of Ukraine, Kyiv
[2] Institute of Geological Sciences of the Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland
[3] M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv
[4] Curtin University, Perth, Australia
[5] Faculty of Geology, University of Warsaw, Warsaw, Poland
[6] Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, Montpellier, France
[7] Chuiko Institute of Surface Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv
[8] Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

CHEMICAL AND ISOTOPIC COMPOSITION OF FLUOR-APATITES FROM INTERMEDIATE IGNEOUS ROCKS OF THE HAISYN BLOCK OF THE UKRAINIAN SHIELD: EVIDENCE OF THE HETEROGENEITY OF THE PRIMARY MELTS

The article investigates fluor-apatite from intermediate igneous rocks of the so-called "sobite" association of the Haisyn Complex in the Ros-Tikych Domain of the Ukrainian Shield. The chemical composition of fluor-apatite, the Sr isotopic composition and the mineral inclusions were examined. In terms of chemical composition, apatites closely resemble stoichiometric fluor-apatite. A significant negative Eu anomaly and the REE pattern are characteristic of apatite from high-Al (peraluminous) granites. On average, the LREE content in fluor-apatite from diorite is higher than that from monzonite. In contrast, the latter contains more Cl, V, Mn, Y, as well as MREE and HREE. Apatite contains numerous mineral inclusions: quartz, amphibole, biotite, K-feldspar, plagioclase, monazite, carbonates, magnetite and graphite. According to the amphibole-plagioclase thermobarometer, the crystallisation temperature of inclusions ranges from 735 to 790 °C, with a pressure of ca. 2 kbar. Apatite from diorite exhibits a relatively constant Sr isotopic composition of $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.71027 \pm 0.00047$, whereas apatite from monzonite shows significant variations in the $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio, with an average value of 0.71369 ± 0.00031. The studied rocks are highly complex, exhibiting features of both peraluminous granitoids and those belonging to the tonalite-trondhjemite-granodiorite association. Fluor-apatites and their inclusions crystallised from the melt, which contained fluid components, primarily water and carbon dioxide. There was a lack of isotopic equilibrium between the melts from which the studied monzonites and diorites crystallized; the diorite melt contained slightly more juvenile components, while the monzonite melt was predominantly a product of the melting of the ancient continental crust.

Keywords: fluor-apatite, REE, Ukrainian Shield, TTG association, diorite, monzonite.