https://doi.org/10.15407/mineraljournal.46.03.055
УДК 550.93

Л.М. Степанюк, д-р геол. наук, чл.-кор. НАН України, проф., заст. дир.
E-mail: stepaniuk@nas.gov.ua; https://orcid.org/0000-0001-5591-5169
Т.І. Довбуш, наук. співроб.
E-mail: tetyana.dovbush1@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3512-3313
Г.Г. Павлов, канд. геол.-мін. наук, старш. наук. співроб.
E-mail: genychpavlov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-5913-042X
О.Б. Висоцький, канд. геол. наук, наук. співроб.
E-mail: alek.vysotsky@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3542-4685
О.В. Ковтун, аспірант
E-mail: kovtun85@ukr.net; https://orcid.org/0000-0003-0475-8778
Н.О. Коваленко, мол. наук. співроб.
E-mail: kovnat.igmr@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3203-7145
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України
03142, м. Київ, Україна, просп. Акад. Палладіна, 34

ПРИРОДА ТА ВЕРХНЯ ВІКОВА МЕЖА ФОРМУВАННЯ ПОРОДНОЇ АСОЦІАЦІЇ ПЕТРІВСЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО РОДОВИЩА

Петрівське залізорудне родовище розташоване на лівому березі р. Інгулець, на південний схід від с. Петрово Олександрійського району Кіровоградської області. Родовище донедавна розробляли кар'єрним способом. Кар'єром розкрита залізорудна товща, складена залізистими кварцитами і кристалічними сланцями. Значно менше у ній сильно розсланцьованих гнейсів, безрудних кварцитів і карбонатних порід. На деяких ділянках кар'єру кристалічні сланці частково мігматизовані, а пачки залізистих кварцитів часто розсічені жилами апліто-пегматоїдних гранітів і пегматитів. За характером розрізу залізорудна товща належить до артемівської світи інгуло-інгулецької серії. За допомогою методів оптичної мікроскопії у середині кристалів акцесорного циркону із гнейсу виявлено різнорідні ядра реліктового (кластогенного) циркону, що дало змогу дійти припущення про первинну осадову його природу, а досить високе ізотопне відношення $^{87}Sr/^{86}Sr$ = = 0,70914 ± 0,00005 в кальциті із кальцифіру вказує на осадонакопичення в басейні, ізольованому від Світового океану. За результатами уран-свинцевого ізотопного датування мультизернових наважок монациту (метод TIMS) граніти, що січуть залізорудну товщу Петрівського родовища, укорінились у палеопротерозої: апліто-пегматоїдний граніт 2033,3 ± 2,3 млн рр. тому та плагіопегматит — 2028,5 ± 5,6 млн рр. Верхньою віковою межею залізорудної товщі пропонуємо вважати вік 2030 млн рр.

***Ключові слова*:** *метод TIMS, монацит, циркон, інгуло-інгулецька серія, Петрівське залізорудне родовище.*

Вступ. Петрівське залізорудне родовище розташоване на лівому березі р. Інгулець, на південний схід від с. Петрово Олександрійського р-ну Кіровоградської обл. Родовище донедавна розробляли кар'єрним способом (рис. 1). Кар'єр розкрив залізорудну товщу, складену залізистими кварцитами і кристалічними сланцями. У різко підпорядкованій

Цитування: Степанюк Л.М., Довбуш Т.І., Павлов Г.Г., Висоцький О.Б., Ковтун О.В., Коваленко Н.О. Природа та верхня вікова межа формування породної асоціації Петрівського залізорудного родовища. *Мінерал. журн.* 2024. **46**, № 3. С. 55—65. https://orcid.org/10.15407/mineraljournal.46.03.055

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2024. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

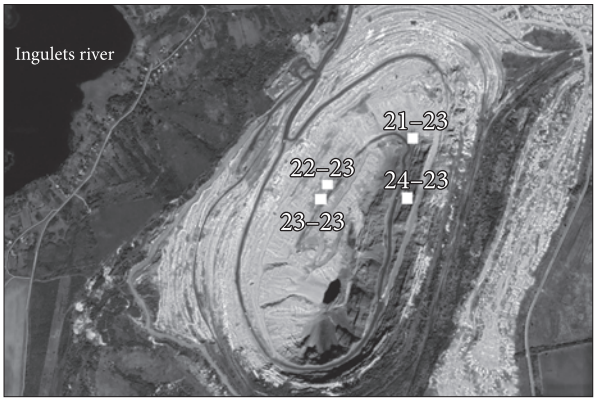

Рис. 1. Супутникова карта Петрівського кар'єру. Квадратами позначені ділянки опробування; цифри біля квадратів — номери проб

Fig. 1. Satellite map of Petrivsky quarry. Test areas are marked with squares; numbers of samples near the squares are numbers

Рис. 2. Фрагмент малопотужної жили апліто-пегматоїдного граніту, нижній уступ південно-східного борту, Петрівський кар'єр

Fig. 2. Fragment of a weak vein of aplito-pegmatoid granite, the lower ledge of the southeastern side of the Petrivsky quarry

кількості трапляються інтенсивно розсланцьовані гнейси, безрудні кварцити і карбонатні породи. У межах кар'єру кристалічні сланці частково мігматизовані, а пачки залізистих кварцитів у багатьох місцях розсічені жилами апліто-пегматоїдних гранітів і пегматитів (рис. 2). За характером розрізу залізорудна товща закартована як артемівська світа інгуло-інгулецької серії (Yesipchuk et al., 2004; State… , 2002).

Мета роботи. За допомогою уран-свинцевого ізотопного методу визначити вік гранітів, який може слугувати верхньою віковою межею для вмісної залізорудної товщі, а також за анатомією кристалів циркону з'ясувати первинну природу порід залізорудної товщі.

Об'єкти та методи дослідження. Викладено результати оптико-мінералогічних досліджень кристалів циркону із лейкократового гнейсу (пр. 22/23) й апліто-пегматоїдного граніту та плагіопегматиту (пр. 21/23 і 23/23), що проривають залізорудні породи Петрівського родовища, а також результати уран-свинцевого ізотопного датування монацитів із цих гранітів. Визначено первинне відношення $^{87}Sr/^{86}Sr$ стронцію із кальциту кальцифіру (пр. 24/23), поширеного у південно-східному борті кар'єру (рівень –60 м). Ділянки відбору проб кристалічних порід для лабораторних досліджень (вивчення анатомії кристалів акцесорного циркону, ізотопного датування монацитів та аналізу ізотопного складу стронцію в карбонаті) наведені на рис. 1.

Монацити датували класичним уран-свинцевим ізотопним методом (*TIMS*) у відділі радіогеохронології Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка (ІГМР) НАН України. Методику хімічної підготовки, за якою готували мультизернові наважки монациту для масспектрометричного аналізу, описано в роботах (Dovbush, Skobelev, Stepanyuk, 2008; Krough, 1973). Для визначення вмісту урану і свинцю в монацитах використали змішаний $^{235}U + {}^{206}Pb$ трасер.

Дослідження ізотопного складу свинцю та урану здійснили на багатоколекторному масспектрометрі MI-1201 AT; математичну обробку експериментальних даних — за програмами Pb Dat (Ludwig, 1989) і *ISOPLOT* (Ludwig, 1990). Похибки визначення віку наведені за 2σ. З метою зіставлення результатів датування використано стандарт циркону ІГМР-1 (Bartnytsky et al., 1995).

Ізотопний склад стронцію визначали в кальциті із кальцифіру (пр. 24/23), розчинивши його 4N соляною кислотою. Стронцій із солянокислої витяжки виділяли за допомогою іонообмінної смоли *Dowex* 50W × × 8 200—400 меш H^+-*form*, за стандартною методикою (Dovbush, Skobelev, Stepanyuk, 2008). Дослідження ізотопного складу стронцію виконано на багатоколекторному мас-

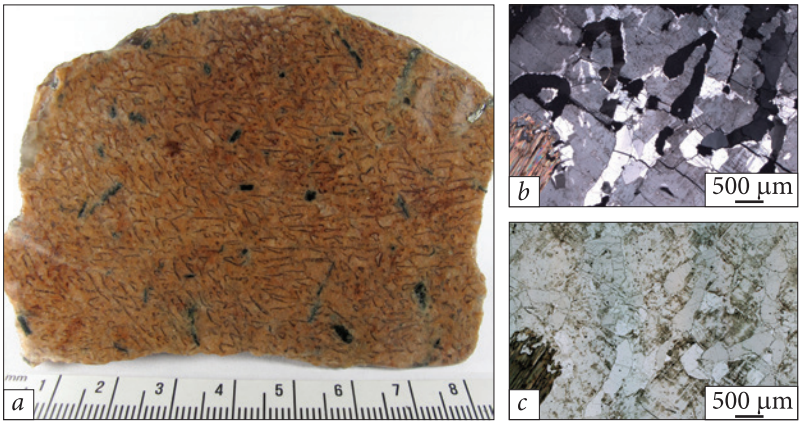

Рис. 3. Фрагмент жили апліто-пегматоїдного граніту, пр. 21/23, пегматит: *a* — загальний вигляд; *b* — пегматитова структура зрощення калієвого польового шпату (сірі зерна) з кварцом (білі та темні хробакоподібні зерна) з виповненням тріщин катаклазу альбітом (світлі прямокутні зерна з полісинтетичним двійникуванням), оптичний мікроскоп *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, аналізатор уведений; *c* — те саме, без аналізатора

Fig. 3. Fragment of vein of aplito-pegmatoid granite, sample 21/23, pegmatite: *a* — general view; *b* — pegmatite structure of intergrowth of potassium feldspar (gray grains) with quartz (white and dark vermiform grains) and with cracks filled with albite (light rectangular grains with polysynthetic twins) optical microscope Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials, the analyzer is introduced; c — too, without an analyzer

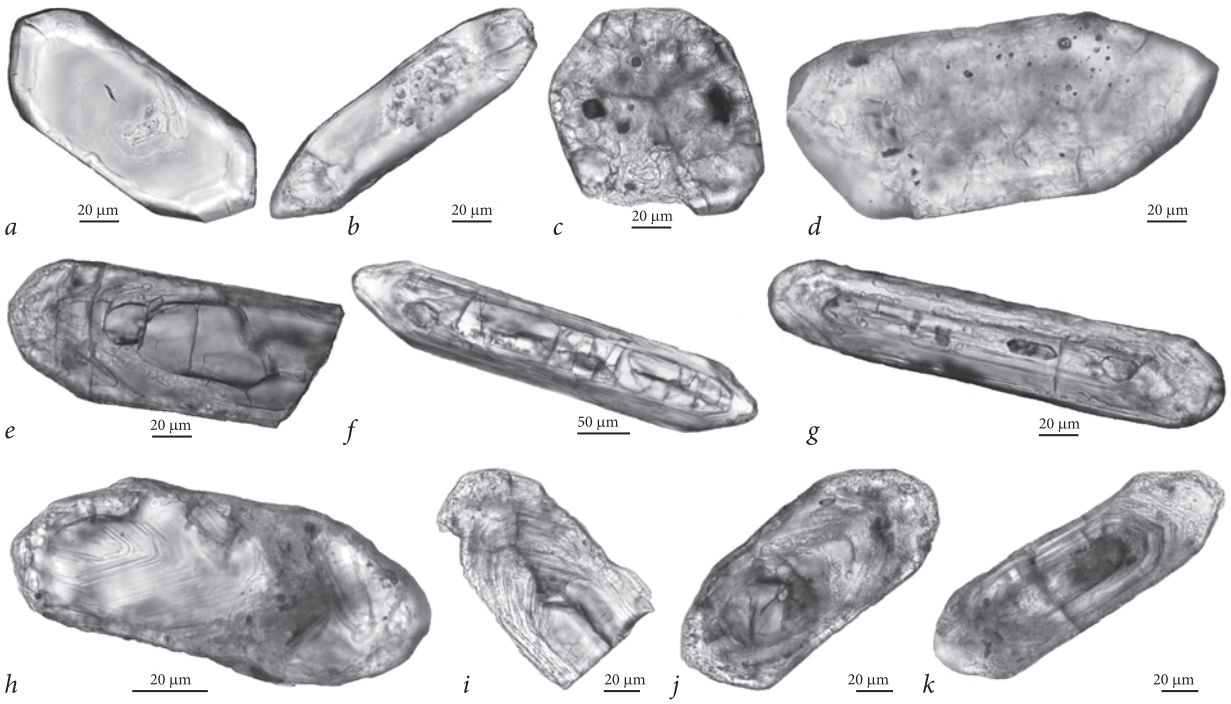

Рис. 4. Мікрофотографії зрізів кристалів циркону із апліто-пегматоїдного граніту, пр. 21/23, оптичний мікроскоп *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, без аналізатора. Пояснення у тексті

Fig. 4. Photomicrographs of sections of zircon crystals from aplite-pegmatoid granite, sample 21/23, optical microscope *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, without analyzer. See text for explanation

спектрометрі MI-1201 AT в статичному режимі з автоматичним уведенням поправки на дискримінацію мас (Dovbush, Skobelev, Stepanyuk, 2008). Похибки визначення ізотопного відношення $^{87}Sr/^{86}Sr$ наведені за 1σ.

Штучні шліфи кристалів циркону вивчали та фотографували оптичним мікроскопом *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, який як

спонсорська допомога компанії *Zeiss Group* був переданий ІГМР НАН України після початку повномасштабного вторгнення РФ в Україну. Штучні шліфи були виготовлені таким чином: під бінокуляром відібрали всі різновиди кристалів циркону, після чого їх розділили за розміром на 5—6 груп, які послідовно занурювали у краплі епоксидної смоли,

нанесені на предметне скло. Після затвердіння епоксидну смолу зрізали спочатку за допомогою водостійкої абразивної шкірки (500) до відкриття зерен циркону, потім — абразивними пастами (7/10 та 3/5) приблизно до половини товщини кристалів, а на завершення відполірували абразивною пастою (0/1).

Результати дослідження та їх обговорення. ***Граніт апліто-пегматоїдний*** кварц-мікрокліновий, альбітизований, пр. 21/23. Формує найбільшу із розкритих кар'єром жил, потужність якої сягає декількох метрів — після підриву уламки граніту покривають площу упоперек простягання більше як на 10 м. Текстура породи типова для жил апліто-пегматоїдних гранітів. Серед уламків є пегматити і апліти.

Граніт складений мікрокліном і кварцом, у незначній кількості присутній біотит. Вторинні мінерали представлені альбітом, що заміщує мікроклін, і хлоритом, який розвивається по біотиту. Із акцесорних мінералів присутні апатит, циркон, монацит та, вірогідно, гідроксид (карбонат?) урану. Із рудних — магнетит та сульфіди.

Для пегматиту характерна крупнокристалічна будова з макрогранофіровою структурою евтектоїдного зростання високотемпературного мікрокліну з кварцом за типом "письмового граніту". Накладеним елементом є катакластична структура з виповненням тріщин альбітом із реакційним заміщенням мікрокліну альбітом по контуру кластів калієвого шпату, й у деяких зернах — по тріщинках у середині зерен КПШ із залученням материнських пертитів (рис. 3).

Циркон у граніті є рідкісним мінералом, у протолочці масою 9 кг трапляються лише поодинокі кристали цього мінералу. Кристали досить дрібні (дрібніші за 0,07 мм), жовтувато-бурі напівпрозорі, у незначній кількості присутні світло-рожеві прозорі. Кристали видовженопризматичні та призматичні гіацинтового типу із заокругленими ребрами.

У полірованих зрізах кристали проявляють неоднорідність, вірогідно зі слідами перекристалізації (рис. 4, *a—d*), в деяких є ядра реліктового циркону (рис. 4, *e—g, i, k*) декількох типів. Найчастіше наявні видовженопризматичні азональні (рис. 4, *e—g*), зрідка трапляються складні (рис. 4, *i—k*). В поодиноких кристалах виявлено тонкозональні ядра (рис. 4, *h*). На реліктовий характер тонкозональної частини кристала вказує перерва в кристалізації між нею та зовнішньою частиною кристала *h* (рис. 4). У лівій частині цього кристала зовнішня кайма зрізає внутрішню упорядкованість центральної тонкозональної частини (ядра) кристала. Таким чином, синпетрогенними граніту найвірогідніше є однорідні кристали типу *a—d* (рис. 4) та оболонки у решти кристалів (рис. 4).

Серед кристалів *монациту* можна виділити дві відміни. Монацити першої представ-

Таблиця 1. **Вміст урану, свинцю та ізотопний склад свинцю в монацитах із апліто-пегматоїдного граніту, пр. 21/23**
Table 1. **Uranium, lead content and isotopic composition of lead in monazites from aplito-pegmatoid granite, sample 21/23**

Fraction of monazite	Concentrations, ppm		Isotope ratios					Age, Ma			D, %
	U	Pb	$\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{206}Pb}{^{207}Pb}$	$\frac{^{206}Pb}{^{208}Pb}$	$\frac{^{206}Pb_r}{^{238}U}$	$\frac{^{207}Pb_r}{^{235}U}$	$\frac{^{206}Pb_r}{^{238}U}$	$\frac{^{207}Pb_r}{^{235}U}$	$\frac{^{207}Pb_r}{^{206}Pb_r}$	
1	5019	7035	1660	7.5035	0.31379	0.37093	6.4144	2034	2034	2034.7	0.0
2	7163	9491	4540	7.8088	0.32284	0.36062	6.2295	1985	2009	2032.9	2.3
3	6475	8944	3100	7.7172	0.28929	0.34576	5.9798	1914	1973	2034.9	5.9

П р и м і т к а. Поправка на звичайний свинець уведена за Стейсі та Крамерсом на вік 2030 млн рр.: 1 — дрібні (<0,04 мм) світло-жовті прозорі переважно пампушкоподібні кристали; 2 — дрібні, переважно (<0,05 мм), бурувато-жовті, червонувато-жовті напівпрозорі кристали; 3 — дрібні, переважно (<0,05 мм), сильно озалізнені червоно-бурі і бурі непрозорі кристали.

N o t e. The correction for ordinary lead is introduced according to Stacey and Kramers for the age of 2030 million years: 1 — small (<0.04 mm) light yellow transparent mostly donut-shaped crystals; 2 — small, mostly (<0.5 mm), brownish-yellow, reddish-yellow translucent crystals; 3 — small, mostly (<0.05 mm), highly ferruginous red-brown and brown non-transparent crystals.

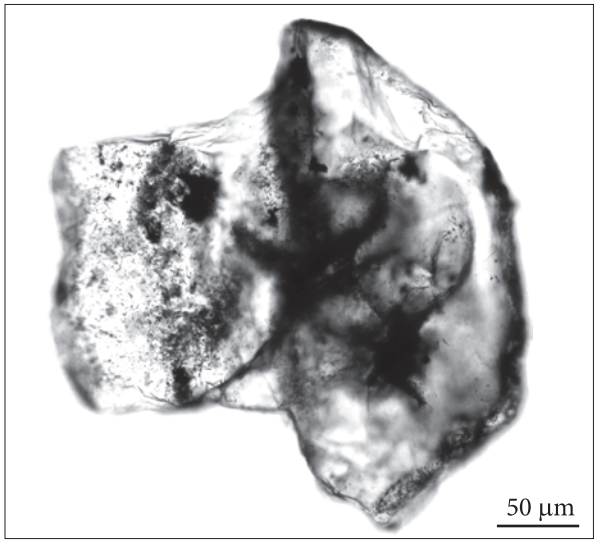

Рис. 5. Мікрофотографія світло-коричневого напівпрозорого кристала монациту, граніт апліто-пегматоїдний, пр. 21/23. Оптичний мікроскоп *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, без аналізатора

Fig. 5. Photomicrograph of light brown translucent monazite crystal, aplito-pegmatoid granite, sample 21/23. Optical microscope *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, without analyzer

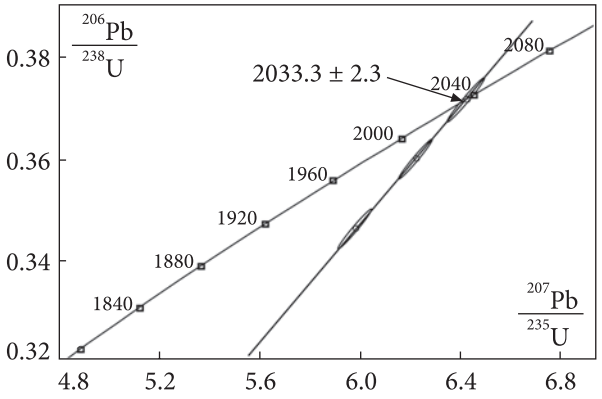

Рис. 6. Уран-свинцева діаграма з конкордією для мультизернових наважок монациту із апліто-пегматоїдного граніту, пр. 21/23

Fig. 6. Uranium-lead diagram with concordia for monazite multigrain measurements from aplite-pegmatoid granite, sample 21/23

лені досить дрібними (переважно дрібніше 0,040 мм) світло-жовтими прозорими (~40 %) пампушкоподібними кристалами із заокругленими контурами та шагреневою поверхнею. У незначній кількості (поодинокі зерна) трапляються більші (дрібніші за 0,1 мм), найчастіше дископодібні зерна. Кристали монациту другої відміни дещо більші (0,07—0,1 мм, поодинокі зерна перевищують 0,1 мм), мають коричневе забарвлення, переважно дископодібні, зрідка ізометричні, пампушкоподібні, напівпрозорі і непрозорі. Для них характерні заокруглені контури та численні дрібні включення коричневого, від темно-коричневого до чорного непрозорого мінералу (рис. 5). Найчастіше такі включення є у зовнішніх ділянках кристалів. Загалом кристали різною мірою озалізнені, від ділянок на поверхні до майже повністю вкритих кірочками гідроксидів заліза. Вміст монациту в граніті надзвичайно низький, менше 1 г/т. Загалом із проби 9 кг було виділено менше 4 мг монациту.

Для ізотопного датування використали три мультизернові наважки кристалів монациту, відібрані вручну під бінокуляром за ступенем прозорості (озалізнення). Результати визначення вмісту урану, свинцю та ізотопного складу свинцю у наважках монациту наведені у табл. 1.

Вік монациту за верхнім перетином конкордії лінією регресії, розрахованими за даними, наведеними в табл. 1, складає 2033,3 ± ± 2,3 млн рр. (рис. 6) і 34 ± 113 млн рр., за

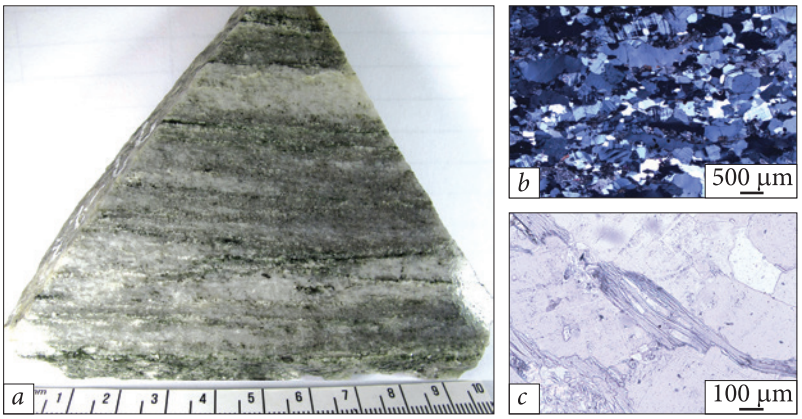

Рис. 7. Гнейс, пр. 22/23: *a* — загальний вигляд гнейсу; *b* — гранобластова структура граніту, оптичний мікроскоп *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, аналізатор введений; *c* — хлоритизований біотит, те саме, без аналізатора

Fig. 7. Gneiss, sample 22/23: *a* — general view of gneiss, *b* — granoblast structure of granite, optical microscope *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, analyzer inserted; *c* — chloritized biotite, also, without analyzer

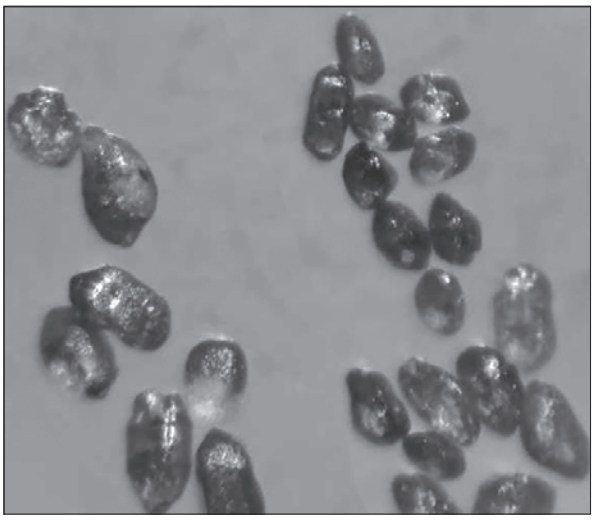

Рис. 8. Мікрофотографія кристалів циркону із гнейсу, пр. 22/23. Бінокулярний мікроскоп *SZM-45T2*

Fig. 8. Photomicrograph of zircon crystals from gneiss, sample 22/23. Binocular microscope SZM-45T2

нижнім, за СКЗВ = 1,7. Отже, отриманий вік 2033,3 ± 2,3 млн рр. можна вважати верхньою віковою межею залізорудної товщі Петрівського родовища.

Лейкократовий гнейс, катаклазований, пр. 22/23. Світло-сіра смугаста порода (рис. 7, *a*), у складі якої, %: кварц — до 40, реліктовий плагіоклаз — 20, КПШ — 10, шаховий альбіт — 20, амфібол актиноліт-тремолітового ряду, хлорит, епідот, мусковіт — 10, рудний мінерал, апатит; циркон — поодинокі зерна. Вторинні — кальцит, серицит, парагоніт, глинисті мінерали.

Текстура шарувата, сланцювата; структура реліктова гранобластова з елементами накладених тектонобластичної, гранулобластичної, метасоматичної та лепідонематобластової (рис. 7, *b*). Кожний зі структурних елементів фіксує відповідний етап перетворення вихідного гнейсу (можливо плагіогнейсу) в кристалічну породу сучасного тектоно-гнейсового вигляду. Тектонічне розгнейсування відбувалось по площинах, споріднених до сплощеного кварцу в умовах амфіболітової фації метаморфізму. Другий етап (діафторитовий) відповідає умовам епідот-амфіболітової фації з активним заміщенням первинного плагіоклазу гранулобластичним "шахматним" альбітом, повторним гранулобластезом кварцу, мікрокліназацією ортоклазу. Чітко фіксується утворення безбарвного амфіболу актиноліт-тремолітового ряду і епідоту, а також синхронне послідовне заміщення деформованого біотиту хлоритом (рис. 7, *c*).

Циркон представлений досить дрібними (переважно дрібніші за 0,05 мм) світло-рожевими, від коричнювато-рожевих до світ-

Таблиця 2. **Вміст урану, свинцю та ізотопний склад свинцю в монацитах із пегматиту, пр. 23/23, Петрівський залізорудний кар'єр**

Table 2. **Content of uranium, lead and isotopic composition of lead in monazites from pegmatite, sample 23/23, Petrivsky iron ore quarry**

Fraction of monazite	Concentrations, ppm		Isotope ratios					Age, Ma			*D*, %
	U	Pb	$\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{206}Pb}{^{207}Pb}$	$\frac{^{206}Pb}{^{208}Pb}$	$\frac{^{206}Pb_r}{^{238}U}$	$\frac{^{207}Pb_r}{^{235}U}$	$\frac{^{206}Pb_r}{^{238}U}$	$\frac{^{207}Pb_r}{^{235}U}$	$\frac{^{207}Pb_r}{^{206}Pb_r}$	
1	6035	12 911	6570	7.8833	0.17175	0.35400	6.0992	1954	1990	2028.2	3.7
2a	5367	11 795	4240	7.8168	0.15406	0.33119	5.7049	1844	1932	2027.8	9.1
2b	5128	11 143	3200	7.7555	0.16266	0.34254	5.9001	1899	1961	2027.7	6.4
3a	5529	11 877	3420	7.8247	0.17400	0.35858	6.1330	1975	1995	2015.2	2.0
3b	5487	9750	2920	7.7876	0.19272	0.32258	5.5147	1802	1903	2014.4	10.5
4	5692	10 731	2390	7.7316	0.19533	0.34559	5.9045	1914	1962	2013.3	4.9

П р и м і т к а. Поправка на звичайний свинець уведена за Стейсі та Крамерсом на вік 2030 млн рр.: 1 — світло-жовті водяно-прозорі, <0,04; 2a — світло-жовті, прозорі, 0,04—0,05 мм; 2b — те саме, <0,04 мм; 3a — жовтувато-бурі, червонувато-бурі напівпрозорі, >0,05 мм; 3b — те саме, >0,07 мм; 4 — червонувато-бурі та бурі, напівпрозорі, >0,05 мм.

N o t e. The correction for ordinary lead is introduced according to Stacey and Kramers for the age of 2030 million years: 1 — light yellow water-transparent, <0.04; 2a — light yellow, transparent, 0.04-0.05 mm; 2b — also, <0.04 mm; 3a — yellowish-brown, reddish-brown translucent, >0.05 mm; 3b — also, >0.07 mm; 4 — reddish-brown and brown translucent, >0.05 mm.

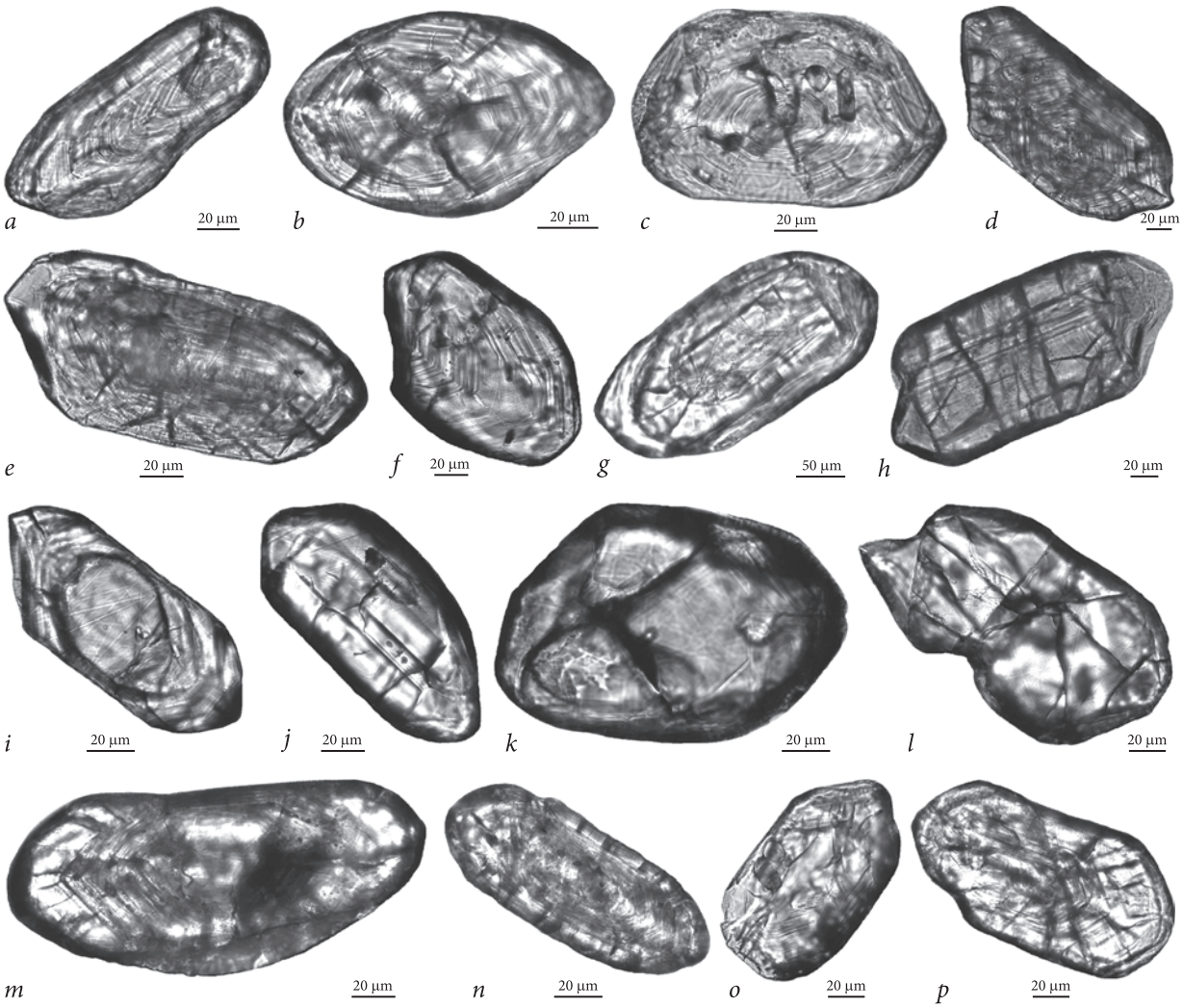

Рис. 9. Мікрофотографії зрізів кристалів циркону із гнейсу, пр. 22/23. Оптичний мікроскоп *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, без аналізатора. Пояснення у тексті

Fig. 9. Photomicrographs of sections of zircon crystals from gneiss, sample 22/23. Optical microscope *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, without analyzer. See text for explanation

ло-коричневих, короткопризматичними, призматичними, зрідка видовженопризматичними кристалами із сильно заокругленими ребрами, а в деяких і з гранями (рис. 8). Кристали здебільшого напівпрозорі, поверхня гладенька, блискуча, подеколи шагренева.

У полірованих зрізах кристали виявляють складну будову, обумовлену наростанням на різнорідні ядра реліктового, найвірогідніше кластогенного, метаморфогенного циркону тонких оболонок (рис. 9). Серед реліктових ядер можна виділити декілька типів:

• тонкозональні із заокругленими контурами та їх абрадовані уламки (рис. 9, *a*—*f*);

• уламки видовженопризматичних зональних кристалів, властивих габроїдам (рис. 9, *g*, *h*);

• азональні із сильно заокругленими (абрадованими) контурами (рис. 9, *i*—*l*);

• складні, утворені комбінацією зональних та азональних (рис. 9, *m*—*p*).

Тобто наявність у середині кристалів циркону різнорідних, зокрема заокруглених (очевидно кластогенних) ядер, свідчить про первинно осадову природу досліджуваного гнейсу.

Плагіопегматит, пр. 23/23. Світло-сіра, майже біла порода з великими чорними виокремленнями біотиту (рис. 10, *a*). Структура пегматиту крупнозерниста, гранобластова, тектонобластова з мірмекітами заміщення. Структура ділянок із виокремленнями біотиту лепідобластова з елементами деформа-

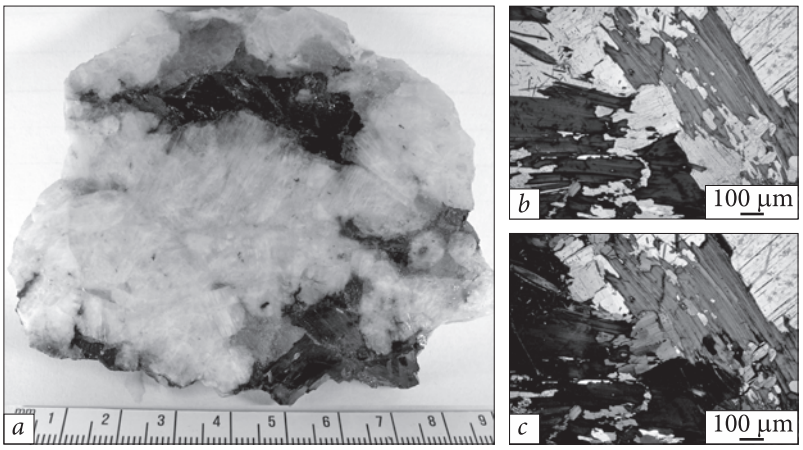

Рис. 10. Плагіопегматит, пр. 23/23: *a* — загальний вигляд пегматиту; *b* — виокремлення біотиту в плагіопегматиті. Оптичний мікроскоп *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, без аналізатора; *c* — те саме, аналізатор уведений

Fig. 10. Plagiopegmatite, sample 23/23: *a* — the general view of the pegmatite; *b* — the separation of biotite in the plagiopegmatite. Optical microscope *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, without analyzer; *c* — is the same, the analyzer is introduced

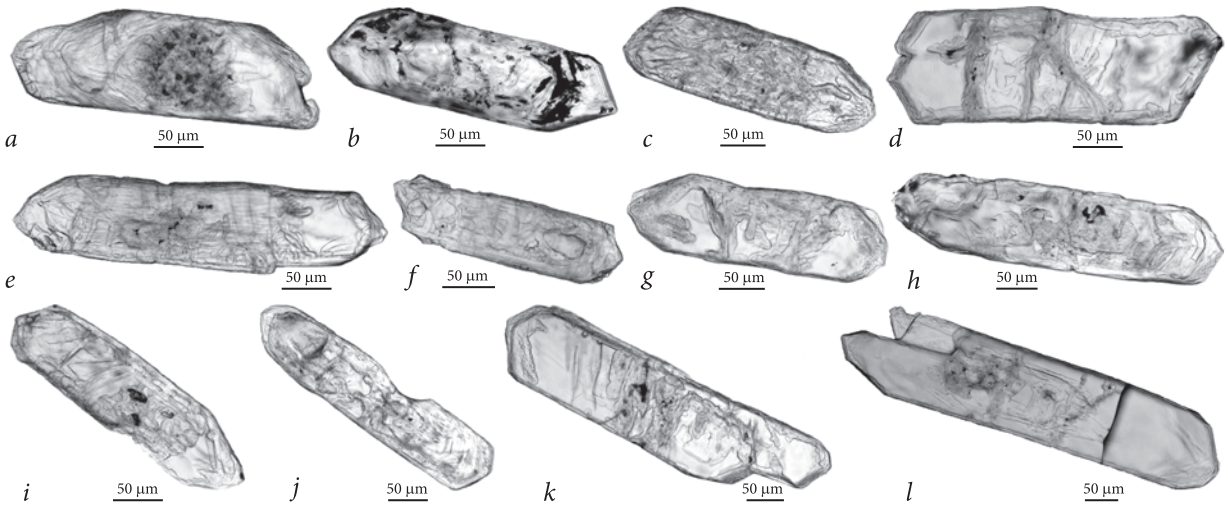

Рис. 11. Мікрофотографії зрізів кристалів циркону із пегматиту, пр. 23/23. Оптичний мікроскоп *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, без аналізатора. Пояснення у тексті

Fig. 11. Photomicrographs of sections of zircon crystals from pegmatite, sample 23/23. Optical microscope *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, without analyzer. See text for explanation

ції, перекристалізації, ділянками мусковітизації (рис. 10, *b*, *c*).

Мінеральний склад — плагіоклаз реліктовий і новоутворений, кварц, біотит, новоутворений мусковіт.

Біотит плеохроює в коричневих тонах, з темними плеохроїчними облямівками і поодинокими плямами у середині кристалів та уздовж площин спайності і тріщин розриву, що свідчить про підвищену радіоактивність метасоматичних розчинів, які супроводжували процеси тектогенезу та перекристалізації породи.

Циркон представлений видовженопризматичними (переважають) і призматичними кристалами гіацинтового типу. Огранення обумовлене комбінацією граней призми {110} та біпіраміди {111}, зрідка відмічаються грані гостріших біпірамід. Поверхня більшості кристалів рівна, гладенька, в деяких (~30 %) шагренева, ділянками кавернозна. В останніх ребра призми і головок кристалів заокруглені.

За кольором можна виділити три основні різновиди: світло-рожеві прозорі, світлі прозорі із золотистим відтінком (світло-жовті) та коричневі (від світло-коричневих до коричневих). У зламах коричневих кристалів центральні ділянки світліші, переважно світло-рожеві.

У полірованих зрізах кристали в основному мають однорідне забарвлення, і лише в деяких виявляється зональність (рис. 11, *a*, *b*). Здебільшого кристали на поверхні мають

дефекти — опуклості та ямки (рис. 11, *a*, *d—i*) на деяких є досить тонкі наростання пізнішого циркону (вірогідно пневматолітового, рис. 11, *c*, *d*, *g*, *j*, *k*). Ще однією особливістю циркону із досліджуваного плагіопегматиту є наявність численних слідів залікованих деформацій (наприклад, рис. 11, *c—k*). На відміну від циркону апліто-пегматоїдного граніту (пр. 21/23), ядра реліктового циркону не виявлені (див. рис. 4 і рис. 11).

Монацити представлені декількома типами кристалів: 1 — світло-жовті водяно-прозорі та прозорі пампушкоподібні (зазвичай дрібніші за 0,05 мм, із заокругленими контурами) та зрідка дископодібні (переважно більші за 0,07 мм, з добре розвиненими гранями пінакоїда); 2 — жовтувато- і червонувато-бурі напівпрозорі до бурих, практично непрозорі кристали. Розмір від дрібних (менше 0,04 мм) до відносно великих (0,1—0,07 мм, поодинокі понад 0,1 мм). У зламах деяких кристалів центральні ділянки світліші (світло-жовті), водночас зовнішні — червоно-бурі та бурі — не утворюють добре виокремлені наростання, а найчастіше мають нечіткі звивисті контакти.

Вік визначено за трьома мультизерновими наважками першого різновиду: одна наважка дрібних (<0,04) світло-жовтих водяно-прозорих кристалів і дві — світло-жовтих прозорих, та за трьома мультизерновими наважками другого різновиду: дві наважки жовтувато- і червонувато-бурих напівпрозорих і одна наважка червонувато-бурих та бурих напівпрозорих кристалів. Результати аналітичних досліджень наведено в табл. 2.

Вік, розрахований за верхнім перетином конкордії лінією регресії для монацитів першого різновиду (фракції 1, 2a і 2b, див. табл. 2), становить 2028,5 ± 5,6 млн рр. (рис. 12) і 17 ± ± 162 млн рр., за нижнім СКЗВ = 0,018. Отриманий вік 2028,5 ± 5,6 млн рр., на нашу думку, є часом проникнення плагіопегматиту.

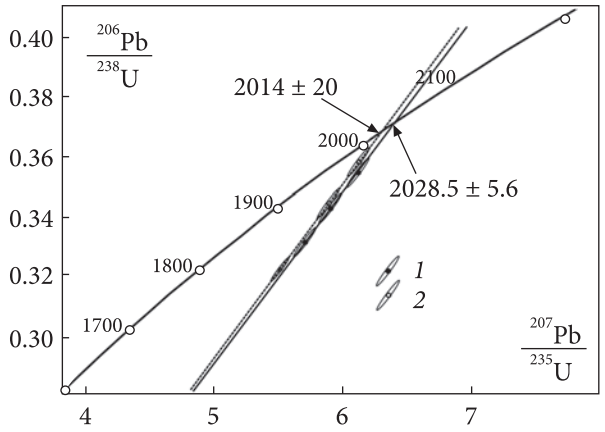

Рис. 12. Уран-свинцева діаграма з конкордією для мультизернових наважок монацитів із плагіопегматиту, пр. 23/23

Fig. 12. Uranium-lead concordia diagram for multigrain monazite weights from plagiopegmatite, sample 23/23

Вік, розрахований за верхнім перетином конкордії лінією регресії для монацитів другого різновиду (фракції 3a, 3b і 4, див. табл. 2), становить 2014 ± 20 млн рр. (рис. 12) та 1 ± ± 394 млн рр., за нижнім СКЗВ = 2,3. Зважаючи на те, що в деяких коричневих кристалах монациту є світліше (світло-жовті) ділянки, вірогідно, монациту першого різновиду, отримане значення віку 2014 ± 20 млн рр., на наш погляд, характеризує мінімально можливий час кристалізації монациту другого різновиду.

Кальцифір, пр. 24/23. Масивна порода, іноді з елементами смугастості (рис. 13, *a*). Структура повнокристалічна гранобластова

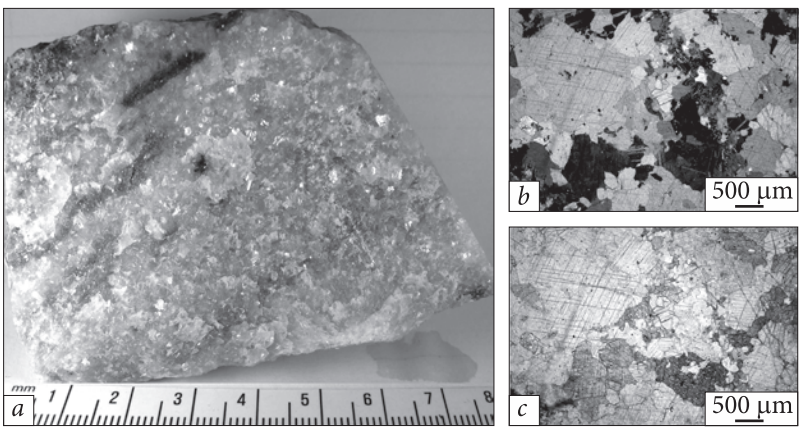

Рис. 13. Кальцифір, пр. 24/23: *a* — загальний вигляд; *b* — повнокристалічна гранобластова структура кальцифіру з елементами тектонобластезу, оптичний мікроскоп *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, з аналізатором; *c* — те саме, без аналізатора

Fig. 13. Calcifer, test 24/23: *a* — general view; *b* — full-crystalline granoblastic structure of calcifer with elements of tectonoblastesis, optical microscope *Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials*, with analyzer; *c* — also, without analyzer

з елементами тектоно-, гранулобластезу та ретроградного заміщення в зонках катаклазу (рис. 13, *b*, *c*). Розмір зерен у непорушеній ділянці породи до 2,5 мм, у ділянках перекристалізації — 0,4—1 мм; олівіну — в межах 0,1—0,5 мм.

Мінеральний склад, %: кальцит — до 90, серпентин та рештки олівіну з безбарвним клінопіроксеном — 10.

Проаналізовано ізотопний склад стронцію в карбонаті цього зразка, для чого розтерту в пудру породу було розчинено в 4*N* соляної кислоти. Ізотопний склад стронцію визначали у витяжці соляної кислоти. Виміряне ізотопне відношення $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,70914 ± ± 0,00005 є досить високим і вказує на можливе осадження карбонату в ізольованому від Світового океану басейні, оскільки в палеопротерозої (давніше за 2,0 млрд рр.) це відношення не перевищувало 0,704 (Faure, 1989).

Висновки. 1. Наявність у розрізі залізорудної товщі метаморфізованих первинно-осадових (гнейси) та хемогенно-осадових (кальцифіри) порід дає змогу припустити її первинно-осадову природу, а досить високе значення ізотопного відношення $^{87}Sr/^{86}Sr$ = = 0,709 свідчить, що осадонакопичення відбувалось у закритому (ізольованому від Світового океану) басейні.

2. Палінгенно-анатектичні граніти, що січуть залізорудну товщу Петрівського родовища, сформувались у палеопротерозої: калішпатовий апліто-пегматоїдний граніт 2033,3 ± 2,3 млн рр. тому і плагіопегматит — 2028,5 ± 5,6 млн рр. За верхню вікову межу залізорудної товщі можна прийняти вік 2030 млн рр.

Автори щиро вдячні керівництву МЕТІНВЕСТ за надання дозволу на відвідання Петрівського кар'єру, а також співробітникам цього підприємства, зокрема Андрію Соколову та Оксані Гуренко, за організацію та проведення польових робіт у кар'єрі й надану можливість відібрати зразки кам'яного матеріалу для лабораторних досліджень, результати яких висвітлено у цій статті.

REFERENCES / ЛІТЕРАТУРА

Bartnytskyi, E.N., Bibikova, E.V., Verkhoglyad, V.M., Legkova, G.V., Skobelev, V.M. and Terets, G.Ya. (1995), *Geochemistry and ore formation,* Iss. 21, Kyiv, pp. 164-167 [in Russian].

[Бартницкий, Е.Н., Бибикова, Е.В., Верхогляд, В.М., Легкова, Г.В., Скобелев, В.М., Терец, Г.Я. (1995), *Геохимия и рудообразование.* Вып. 21. С. 164—167.]

Dovbush, T.I., Skobelev, V.M. and Stepanyuk, L.M. (2008), *Methodological recommendations for uranium-lead, rubidium-strontium and samarium-neodymium isotopic dating of geological objects at the GRR,* UkrDGRI, Kyiv, 77 p. [in Ukrainian].

[Довбуш, Т.І., Скобелєв, В.М., Степанюк, Л.М. (2008), *Методичні рекомендації з уран-свинцевого, рубідій-стронцієвого та самарій-неодимового ізотопного датування геологічних об'єктів при ГРР.* Київ: УкрДГРІ. 77 с.]

Yesipchuk, K.Yu., Bobrov, O.B., Stepanyuk, L.M., Shcherbak, M.P., Hlevaskyi, Ye.B., Skobelev, V.M., Drannyk, A.S. and Geichenko, M.V. (2004), *Correlative chronostratigraphic scheme of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield (explanatory note*), UkrDGRI, Kyiv, 29 p. [in Ukrainian].

[Єсипчук, К.Ю., Бобров, О.Б., Степанюк, Л.М., Щербак, М.П., Глеваський, Є.Б., Скобелєв, В.М., Дранник, А.С., Гейченко, М.В. (2004), *Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита (пояснюв. зап.).* Київ: УкрДГРІ. 29 с.]

Krough, T.E. (1973), *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 37, No. 3, pp. 485-494.

Ludwig, K.R. (1989), *Pb Dat for MS-DOS, version 1.06.* U.S. Geol. Survey Open-File Rept. No. 88, 542, p. 40.

Ludwig, K.R. (1990), *ISOPLOT for MS-DOS, version 2.0.* U.S. Geol. Survey Open-File Rept. No. 88, 557, p. 38.

(2002), *State geological map of Ukraine.* Central Ukrainian series*:* M-36-XXXIV, Zhovti Vody, Kyiv [in Ukrainian].

[(2002), *Державна геологічна карта України.* Центральноукраїнська серія: M-36-XXXIV, Жовті Води. Київ.]

Faure, G. (1989), *Principles of Isotope Geology,* Transl. from Engl., Mir, Moscow, 590 p. [in Russian].

[Фор, Г. (1989), *Основы изотопной геологии.* Пер. с англ. Москва: Мир. 590 с.]

Received 26.03.2024

L.M. Stepanyuk, DrSc (Geology), Corresp. Member of NAS of Ukraine, Prof., Deputy Director
E-mail: stepaniuk@nas.gov.ua; https://orcid.org/0000-0001-5591-5169
T.I. Dovbush, Researcher Fellow
E-mail: tetyana.dovbush1@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3512-3313
H.H. Pavlov, PhD (Petrology), Senior Research Fellow
E-mail: genychpavlov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-5913-042X
O.B. Vysotsky, PhD (Geology), Research Fellow
E-mail: alek.vysotsky@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3542-4685
O.V. Kovtun, Postgraduate
E-mail: kovtun85@ukr.net; https://orcid.org/0000-0003-0475-8778
N.O. Kovalenko, Junior Research Fellow
E-mail: kovnat.igmr@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3203-7145
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

THE NATURE AND UPPER AGE LIMIT OF THE FORMATION
OF THE ROCK ASSOCIATION OF THE PETRIVSKY IRON ORE DEPOSIT

The Petrivsky iron ore deposit is located on the left bank of the Ingulets River, southeast of the village Petrovo, Oleksandriysky district, Kirovohrad region. Until recently, the deposit was developed of the quarry method. The quarry revealed an iron ore stratum composed of ferruginous quartzites and crystalline schists, and strongly schistulated gneisses, ore-free quartzites and carbonate rocks occur in sharply subordinate quantities. In some areas of the quarry, the crystalline slates are partially migmatized, and the bundles of ferruginous quartzite are in many places dissected by veins of aplito-pegmatoid granites and pegmatites. According to the nature of the section, the iron ore stratum belongs to the Artemivska suite of the Ingulo-Ingulets series. Optical microscopy methods revealed heterogeneous cores of relict (clastogenic) zircon within the accessory zircon crystals from gneiss, which made it possible to make an assumption about its primary sedimentary nature, and rather high isotopic ratio $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70914 \pm 0.00005$ in calcite from calciphyre indicates on sediment accumulation in a basin isolated from the world ocean According to the results of uranium-lead isotope dating of different-grained monazite samples (TIMS method), the granites dissect the iron ore stratum of the Petrivske deposit were rooted in the Paleoproterozoic: aplito-pegmatoid granite 2033.3 ± 2.3 million years ago and plagiopegmatite — 2028.5 ± 5.6 million oyears ago. It is proposed to take the age of 2030 million years as the upper age limit of the iron ore stratum.

Keywords: TIMS method, monazite, zircon, Ingulo-Ingulets series, Petrivsky iron ore deposit.