

УДК 549.655+552.311

DOI: 10.46698/VNC.2026.86.94.001

Оригинальная статья

Фтор-глиноземистый титанит (гротит) из гранитов турочакского комплекса (Горный Алтай)

Е.В. Наставко^{ORCID}, Т.В. Лешуков^{ORCID}, Б.Ю. Змеев^{ORCID}, Г.А. Федосюк^{ORCID}Кемеровский Государственный Университет, Россия, 650000, г. Кемерово,
ул. Красная, 6, e-mail: evnastavko@yandex.ru

Статья поступила: 09.10.2025, доработана: 23.02.2026, принята к публикации: 25.02.2026

Резюме: Актуальность работы. Использование титанита в качестве минерала геохронометра в последнее время приобретает все большую популярность. При этом в гранитоидах встречается как магматический, так и метаморфический титанит. Последний является продуктом низкоградного преобразования биотита. Индикатором генезиса титанита могут служить содержания железа, фтора и глинозема, а также их разнообразные отношения. Наиболее информативными в составе фтор-глиноземистого титанита могут выступать отношения Fe/Al и $(Fe+Al)/F$, указывающие на магматическое или метаморфическое происхождение титанита. **Целью исследования** является изучение химического состава титанита для определения его генезиса в гранитах турочакского комплекса и возможности его последующего использования для геохронологических исследований. **Объектом исследования** являлся титанит из гранитов третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса ($\gamma D_1 t$), расположенного в Горно-Алтайском фрагменте Алтае-Минусинского ранне-среднедевонского магматического пояса Алтае-Саянской складчатой области (АССО). **Методы** исследования включали: петрографическое описание пород, изучение состава титанита с последующим выполнением кристаллохимических пересчетов состава титанита зарядным методом и составление формул, а также анализ отношений Fe/Al и $(Fe+Al)/F$ в составе титанита. Химический состав определялся в полированных шлифах на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) *Tescan Vega3* с приставкой рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа *Oxford*. **Результаты исследований.** Установлено, что титанит из гранитов турочакского комплекса является фтор-глиноземистым и имеет следующую формулу $(Ca_{0.97-1.00}Fe_{0.01-0.02})_{\Sigma 0.99-1.01}(Ti_{0.79-0.81}Al_{0.18-0.22})_{\Sigma 0.98-1.01}(Si_{0.98-1.00}Al_{0-0.02})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.81-0.86}F_{0.14-0.19})_{\Sigma 1.00}$. Отношения в его составе Fe/Al (менее 1:8) и $(Fe+Al)/F$ (близко к 1:1) свидетельствуют о метаморфическом генезисе титанита и, как следствие, невозможности его применения для целей геохронологии гранитов турочакского комплекса.

Ключевые слова: граниты, гротит, геохронометры, титанит, фтор-глиноземистый титанит, турочакский комплекс, Горный Алтай.

Для цитирования: Наставко Е.В., Лешуков Т.В., Змеев Б.Ю., Федосюк Г.А. Фтор-глиноземистый титанит (гротит) из гранитов турочакского комплекса (Горный Алтай). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 8-19. DOI: 10.46698/VNC.2026.86.94.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.86.94.001

Original paper

Flourine-aluminous titanite (grothite) from granites of the Turochak complex (Altai Mountains)

E.V. Nastavko^{ORCID}, T.V. Leshukov^{ORCID}, B.Yu. Zmeev^{ORCID}, G.A. Fedosyuk^{ORCID}Kemerovo State University, 6 Krasnaya Str., Kemerovo 650000,
Russian Federation, e-mail: evnastavko@yandex.ru

Received: 09.10.2025, revised: 23.02.2026, accepted: 25.02.2026

Abstract: Relevance. The use of titanite as a geochronometer mineral has recently become increasingly popular. In this case, both magmatic and metamorphic titanite are found in granitoids. The latter is a product of low-grade biotite transformation. The content of iron, fluorine and alumina, as well as their various ratios, can serve as an indicator of titanite genesis. The most informative in the composition of fluorine-aluminous titanite can be the Fe/Al and $(Fe+Al)/F$ ratios indicating the magmatic or metamorphic origin of titanite. **The aim** of the paper is to study the chemical composition of titanite to determine its genesis in the granites of the Turochak complex and the possibility of its subsequent use for geochronological studies. **The object** of the study was titanite from granites of the third phase of the intrusion of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex ($\gamma D_1 t$) located in the Gorno-Altai fragment of the Altai-Minusinsk early-middle Devonian igneous belt of the Altai-Sayan folded region (ASFR). The research methods included: petrographic description of rocks, study of titanite composition with subsequent crystallochemical recalculations of titanite composition by the charging method and compilation of formulas, as well as analysis of Fe/Al and $(Fe+Al)/F$ ratios in titanite. The chemical composition was determined in polished sections on a Tescan Vega3 scanning electron microscope (SEM) with an Oxford X-ray fluorescence energy-dispersive analysis attachment. **Results.** It was established that titanite from the granites of the Turochak complex is fluorine-alumina and has the following formula $(Ca_{0.97-1.00}Fe_{0.01-0.02})_{\Sigma 0.99-1.01}Ti_{0.79-0.81}Al_{0.18-0.22})_{\Sigma 0.98-1.01}(Si_{0.98-1.00}Al_{0-0.02})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.81-0.86}F_{0.14-0.19})_{\Sigma 1.00}$. The ratios in its composition Fe/Al (less than 1:8) and $(Fe+Al)/F$ (close to 1:1) indicate the metamorphic genesis of titanite and, as a consequence, the impossibility of its use for the purposes of geochronology of the granites of the Turochak complex.

Keywords: granites, grothite, geochronometers, titanite, flourine-aluminous titanite, Turochak complex, Altai Mountains.

For citation: Nastavko E.V., Leshukov T.V., Zmeev B.Yu., Fedosyuk G.A. Fluorine-aluminous titanite (grothite) from granites of the Turochak complex (Altai Mountains). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 8-19. DOI: 10.46698/VNC.2026.86.94.001

Введение

Титанит является распространенным акцессорным минералом многих изверженных и метаморфических пород, который наряду с цирконом, апатитом, рутилом, монацитом и алланитом, дает важные представления о процессах магматизма и метаморфизма [Scibiorski, Cawood, 2022; Van Schijndel et al., 2024]. Особенности его химического состава позволяют использовать его в целях радиоизотопного датирования [Frost et al., 2001], которое приобретает все большую популярность [Балтыбаев и др., 2024; Дорошкевич и др., 2022; Кориш и др., 2024; Скублов и др., 2021; Kasay et al., 2024; Kawohl et al., 2023; Li. et al., 2022; Qiu et al., 2025; Wei et al., 2024], и геотермометрии [Erdmann et al., 2019; Hayden et al., 2008].

Фтор-глиноземистый титанит (гротит) имеет следующую формулу (Ca,REE) (Ti,Al,Fe) $SiO_4(O,OH,F)$ и кристаллизуется в широком диапазоне температур и давлений, при этом отмечено, что с ростом давления в нем, так же как и в амфиболе, возрастает содержание алюминия [Markl, Piazzolo, 1999; Tropper et al., 2002]. Изначально считалось, что главным фактором появления гротита в минеральном парагенезисе являются высокие параметры давления в диапазоне 18–22 кбар [Franz, Spear, 1985], поскольку именно высокое давление способствует вхождению алюминия в структуру титанита. Подобный высокоглиноземистый титанит, содержащий одновременно существенные количества фтора и глинозема (Al_2O_3 до 14 мас. %, F до 2,5 мас. %), обнаружен в эклогитах, доломитах и мраморах Австрии [Castelli, Rubatto, 2002; Franz, Spear, 1985]. При этом в последние годы появляется все больше данных о нахождении высокоглиноземистого титанита в породах и рудах средних и низких PT -параметров образования. Где, вероятно, его формирование может определяться другими факторами, такими как состав породы и флюидная фаза [Markl, Piazzolo, 1999]. Так, высокоглиноземистый титанит (Al_2O_3 7,9–12,7 мас. %) описан в рудах золотополиметаллического Березитового месторождения Верхнего Приамурья, которое имеет средние PT -параметры образования. Появление высокоглиноземистого титанита авторы объясняют повышенной активностью фтора минералообразующей среды [Вах и др., 2009]. С повышенной концентрацией фтора в расплаве связывают находку гротита (Al_2O_3 до 8,5 мас. %, F до 2 мас. %) в виде включений в цирконах из гранитоидов кристаллического фундамента Южного Ямала [Ерохин и др., 2019]. Оценка флюидного режима может помочь при определении потенциальной рудоносности гранитов (золото, уран, вольфрам, молибден, медь, цинк, свинец, литий, бериллий и т.д.) Урала [Коновалова и др., 2013], Горного Алтая [Гусев, Коробейников, 2014] и Большого Кавказа [Газеев и др., 2024; Гусев и др., 2023].

Кроме того, описан гротит для пород зеленосланцевой фации метаморфизма. Примерами могут служить титаниты в гранат-слюдистых сланцах шихтинской свиты Срединнокамчатского массива [Тарарин и др., 2011] и сланцев Иртышской зоны смятия Восточного Казахстана [Наставко и др., 2024]. В обоих случаях его формирование происходило в условиях низких давлений и температур зеленосланцевой фации метаморфизма.

F , Al и Fe в составе титанита могут использоваться для определения условий его формирования [Kowallis et al., 2022; Scibiorski, Cawood, 2022]. Так, отношения Fe/Al и $(Fe+Al)/F$ в фтор-глиноземистом титаните может использоваться как индикатор его метаморфического ($Fe/Al < 1:2$, $(Fe+Al)/F$ близко к 1:1 и почти всегда $> 1:2$) или магматического (Fe/Al близко к 1:1 и почти всегда $> 1:2$, $(Fe+Al)/F$ практически всегда $< 1:2$) генезиса.

Цель работы заключается в выяснении природы титанита на основе его химического состава и возможности его применения для геохронологических целей в гранитах турочакского комплекса.

Геологическое строение района исследований

Турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс ($\gamma D_1 t$) относится к Горно-Алтайскому, который является редуцированной частью Алтае-Минусинского ранне-среднедевонского магматического пояса и представлен только лохковским циклом в виде гранитоидного магматизма. В целом данный пояс сформирован в условиях активной континентальной окраины кордильерского типа. Территориально массив располагается в Турочакском районе Республики Алтай (рис. 1).

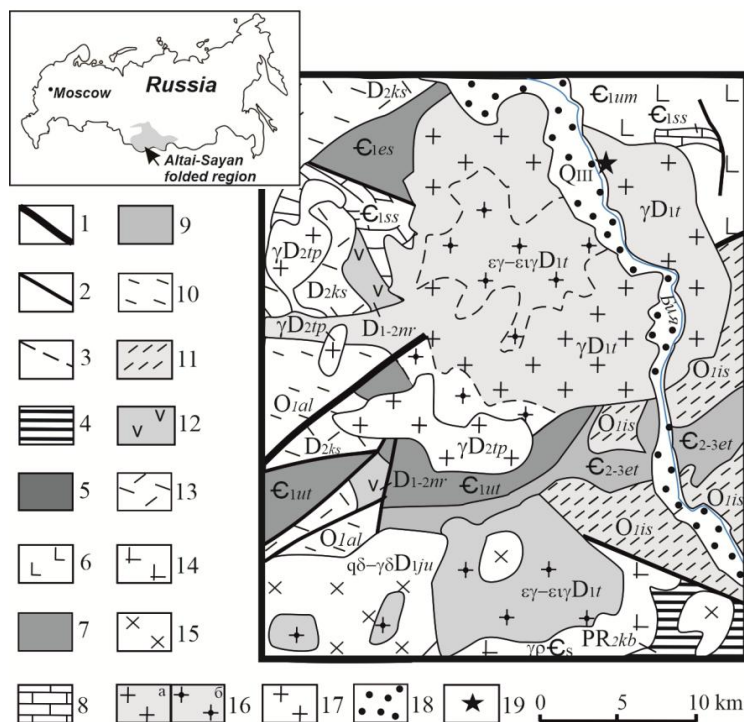


Рис. 1. Схема расположения (А) и строения (Б) турочаского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса по [Бабин и др., 2007]:

1-3 – разрывные нарушения: 1-2 – достоверные: 1 – главные, 2 – прочие, 3 – предполагаемые; 4 – кебезенский плагиогнейсово-амфиболитовый комплекс (PR₂kb); 5 – эсконгинская свита (Є_{1es}), 6 – усть-анзасско-манжерокская свита (Є_{1um}); 7 – убинско-тырганская группа свит (Є_{1ut}); 8 – сийская терригенно-карбонатная свита (Є_{1ss}); 9 – еландинско-тандошинская группа свит (Є_{2-3et}); 10 – алзасская свита (O_{1al}); 11 – ишпинская свита (O_{1is}); 12 – нырнинская свита (D_{1-2nr}), 13 – кротинско-саганская группа свит (D_{2ks}); 14 – саракокшинский диорит-тоналит-плагиогранитовый комплекс (γD_{2tp}), 15 – югалинский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс (qδ-γδD_{1ju}); 16 – турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс (D_{1t}): а – порфировидные биотитовые граниты и лейкограниты, граносиениты, аляскиты, аплитовидные граниты (γD_{1t}), б – порфировидные биотитовые умеренно-щелочные граниты и лейкограниты (εγ-εγD_{1t}); 17 – топольнинский диорит-гранодиоритовый комплекс (γD_{2tp}); 18 – озерно-аллювиальные четвертичные отложения (Q_{III}); 19 – место отбора проб /

Fig. 1. Scheme of the location (A) and structure (B) of the Turochaksky granosyenite-granite-leucogranite complex according to [Babin et al., 2007]:

1-3 – faults: 1-2 – reliable: 1 – main, 2 – other; 3 – inferred; 4 – Kebezen plagiogniss-amphibolite complex (PR₂kb); 5 – Eskonginskaya suite (Є_{1es}), 6 – Ust-Anzas-Manzherok suite (Є_{1um}); 7 – Uba-Tyrgan group of suites (Є_{1ut}); 8 – Siyskaya terrigenous-carbonate suite (Є_{1ss}); 9 – Elandinsko-Tandoshinskaya group of suites (Є_{2-3et}); 10 – Alzas suite (O_{1al}); 11 – Ishpinskaya suite (O_{1is}); 12 – Nyrninskaya suite (D_{1-2nr}), 13 – Krotinsko-Saganskaya group of suites (D_{2ks}); 14 – Sarakokshinsky diorite-tonalite-plagiogranite complex (γD_{2tp}), 15 – Yugalinsky gabbro-diorite-granodiorite complex (qδ-γδD_{1ju}); 16 – Turochaksky granosyenite-granite-leucogranite complex (D_{1t}): a – porphyritic biotite granites and leucogranites, granosyenites, alaskites, aplite-like granites (γD_{1t}), b – porphyritic biotite moderately alkaline granites and leucogranites (εγ-εγD_{1t}); 17 – Topolninsky diorite-granodiorite complex (γD_{2tp}); 18 – lacustrine-alluvial Quaternary deposits (Q_{III}); 19 – sampling site

Турочакский массив имеет трехфазное зональное строение. Центральная часть массива сложена породами первых двух фаз внедрения (суммарно 10 %), которые представлены меланогранитами и умереннощелочными гранитами. Меланограниты состоят из кислого плагиоклаза альбит-олигоклазового состава (30–50 %), калиевого полевого шпата (20–40 %), кварца (15–30 %), амфибола (10–15 %) и биотита (до

5 %). В умереннощелочных гранитах, по сравнению с меланогранитами, возрастает доля калиевого полевого шпата (30–60 %), при близком количестве плагиоклаза (30–50 %) и кварца (25–30 %), из темноцветных минералов присутствует только биотит (до 5 %).

Периферические части массива сложены третьей фазой внедрения (до 90 %), состоящей из неравнозернистых, порфирированных и аплитовидных биотитовых, биотит-мусковитовых лейкогранитов, умеренно щелочных лейкогранитов и аляски-тов. Лейкограниты состоят из кварца (30–35 %), плагиоклаза (25–35 %), калиевого полевого шпата (35–40 %), биотита (до 10 %) и мусковита (до 5 %). В аляски-тах количество кварца достигает 40–50 %. Для пород данной фазы характерно обилие аксессуаров: магнетит, ильменит, пиррофанит и манганоильменит, титанит, апатит и циркон, гранат, монацит, а также минералы группы эпидота – алланит-(*Se*) и эпидот.

Датировка комплекса, полученная *U–Pb* методом по цирконам из порфирированных биотитовых гранитов Турочакского массива горы Большой Иконостас (390 ± 6 млн лет) и умеренно-щелочных гранитов горы Цаган (400 ± 4 млн лет), принята как раннедевонская [Бабин и др., 2007].

Материалы и методы исследований

Отбор 9 проб осуществлен на расстояниях от 35 до 75 метров из коренных выходов горы Большой Иконостас, Республика Алтай. Одна проба получена из скального выхода у подножия горы на уровне уреза воды р. Бия. Все пробы отнесены к гранитам третьей фазы внедрения турочакского комплекса. Для всех проб было выполнено петрографическое описание и кристаллохимический пересчет состава минералов зарядным методом по методике, разработанной в работе [Oberti et al., 1991]. Далее был проведен анализ отношений Fe/Al и $(Fe+Al)/F$ в составе титанита и построены диаграммы для выяснения его генезиса.

Титанит обнаружен во всех 10 образцах и приурочен исключительно к лейстам хлоритизированного биотита. Зерна идиоморфные, максимальный размер составляет 0,25 мм. Суммарно в 10 образцах гранитов проанализирован состав 86 зерен титанита.

Химический состав установлен с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) *Tescan Vega3* с приставкой рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа *Oxford*. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа полированных шлифов гранитов составило 20 кВ.

Краткая петрографическая характеристика пород

Граниты основной третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса макроскопически представляют собой лейкократовые породы со светло-розовым до розового окрасом. Часто граниты покрыты черными пленками окислов и гидроокислов марганца. Породы макроскопически имеют среднезернистую, реже крупнозернистую, порфирированную, гипидиоморфнозернистую структуру и массивную текстуру. Под микроскопом устанавливается типичная гранитная, местами микропегматитовая структура. Для калиевого полевого шпата характерна микроклиноватая решетка, что позволяет отнести его к микроклину. Зерна кварца ксеноморфные, заполняют интерстиции.

Минеральный состав достаточно устойчив и представлен на 35–40 % калиевым полевым шпатом, 25–30 % плагиоклазом альбитового состава ($An_{0.3}$) и 25–30 % кварцем. Содержание биотита достигает 10 %, а мусковита не превышает 1 %. Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом, минералами группы эпидота (алланит-*Se* с каймой из редкоземельного эпидота и эпидот) и группы ильменита

(пирофанит и манганоильменит), а также титанитом. Наблюдаются слабовыраженные вторичные изменения в виде хлоритизации биотита и незначительной сосюритизации плагиоклаза.

Титанит обнаружен во всех 10 образцах и приурочен исключительно к лейстам хлоритизированного биотита. Зерна титанита идиоморфные без зональности размером от 0,05 мм (рис. 2) до 0,20 мм. Суммарно в 10 образцах гранитов проанализирован состав 86 зерен титанита.

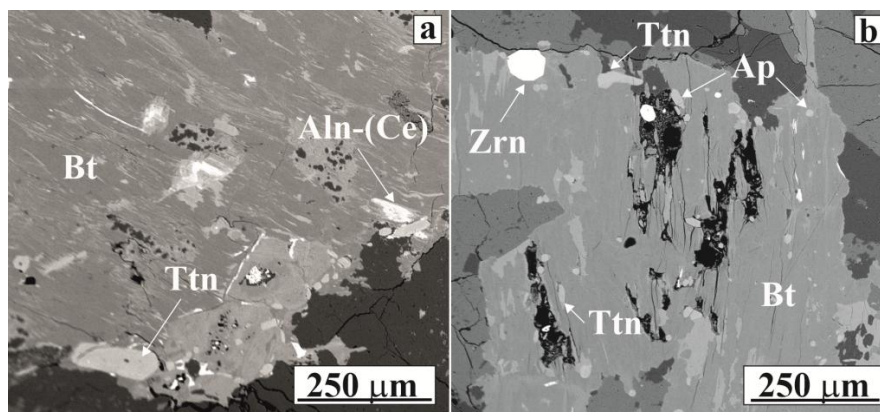


Рис. 2. Зерна титанита приуроченные к лейстам биотита. Условные обозначения приняты по [Warr, 2021]: Aln-(Ce) – цериевый алланит, Ap – апатит, Bt – биотит, Ttn – титанит, Zrn – циркон /

Fig. 2. Titanite grains confined to biotite laths. The designations are adopted according to [Warr, 2021]: Aln-(Ce) – cerium allanite, Ap – apatite, Bt – biotite, Ttn – titanite, Zrn – zircon

Результаты работ и их обсуждение

Сводный химический состав гротита по 86 определениям приведен в таблице 1. Содержание глинозема варьирует от 4,78 до 6,20 мас. %, фтора от 1,49 до 2,03 мас. %. Также для титанита характерно постоянное наличие железа в следующих количествах 0,39–0,75 мас. %.

Таблица 1 / Table 1

Вариации химического состава гротита (мас. %) /
Chemical composition of grothite (wt. %)

Элементы/ Elements	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO
мин – макс ср. знач min – max avg	30.38 – 30.99 30.71	32.13 – 33.38 32.96	4.78 – 6.20 5.37	0.39 – 0.75 0.58	28.01 – 28.99 28.66

В связи с большим количеством определений химического состава минерала, в таблице 2 для наглядности приводятся по одному составу формуле для каждого образца.

С учетом всех 86 определений химического состава общая формула титанита имеет следующий вид – $(Ca_{0.97-1.00}Fe_{0.01-0.02})_{\Sigma 0.99-1.01}Ti_{0.79-0.81}Al_{0.18-0.22})_{\Sigma 0.98-1.01}(Si_{0.98-1.00}Al_{0-0.02})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.81-0.86}F_{0.14-0.19})_{\Sigma 1.00}$.

Фигуративные точки состава титанита на диаграммах Al–Fe, Al–F, Fe+Al–F и Fe–F [Kowallis et al., 2022] располагаются в поле титанита метаморфических пород (рис. 3). Отношение железа к алюминию в изученном титаните составляет менее 1 к 2 ($Fe/Al < 1:2$), а суммы железа и алюминия к фтору ($Fe+Al)/F$ близко к 1:1 и почти всегда более чем 1:2.

Таблица 2 / Table 2

Химический состав гротита (мас. %) / Chemical composition of grothite (wt. %)

Элементы/ Elements	№ образца/ Sample No									
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
SiO ₂	30.58	30.87	30.99	30.68	30.78	30.41	30.77	30.71	30.65	30.58
TiO ₂	32.74	33.26	33.36	32.87	33.20	32.62	33.08	32.97	32.82	32.71
Al ₂ O ₃	5.68	5.02	4.78	5.39	5.11	6.18	5.21	5.30	5.48	5.58
FeO	0.67	0.46	0.39	0.60	0.51	0.75	0.54	0.58	0.62	0.65
CaO	28.41	28.87	28.99	28.71	28.82	28.01	28.76	28.72	28.62	28.6
F	1.92	1.52	1.49	1.75	1.58	2.03	1.64	1.72	1.81	1.88
O=F	-0.81	-0.64	-0.63	-0.74	-0.67	-0.85	-0.69	-0.72	-0.76	-0.79
Сумма / Total	99.19	99.36	99.37	99.26	99.33	99.15	99.31	99.28	99.24	99.21

Формулы рассчитаны методом по зарядам / The formulas are calculated using the charge method.

1. $(Ca_{0.98}Fe_{0.02})_{\Sigma 1.00}(Ti_{0.80}Al_{0.21})_{\Sigma 1.01}(Si_{0.99}Al_{0.01})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.82}F_{0.18})$
2. $(Ca_{1.00}Fe_{0.01})_{\Sigma 1.01}(Ti_{0.81}Al_{0.18})_{\Sigma 0.99}(Si_{0.99}Al_{0.01})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.86}F_{0.14})$
3. $(Ca_{1.00}Fe_{0.01})_{\Sigma 1.01}(Ti_{0.81}Al_{0.18})_{\Sigma 0.99}(Si_{1.00})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.86}F_{0.14})$
4. $(Ca_{0.99}Fe_{0.02})_{\Sigma 1.01}(Ti_{0.80}Al_{0.19})_{\Sigma 0.99}(Si_{0.99}Al_{0.01})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.84}F_{0.16})$
5. $(Ca_{1.00}Fe_{0.01})_{\Sigma 1.01}(Ti_{0.80}Al_{0.18})_{\Sigma 0.98}(Si_{0.99}Al_{0.01})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.85}F_{0.15})$
6. $(Ca_{0.97}Fe_{0.02})_{\Sigma 0.99}(Ti_{0.79}Al_{0.22})_{\Sigma 1.01}(Si_{0.98}Al_{0.02})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.81}F_{0.19})$
7. $(Ca_{0.99}Fe_{0.01})_{\Sigma 1.00}(Ti_{0.80}Al_{0.19})_{\Sigma 0.99}(Si_{0.99}Al_{0.01})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.85}F_{0.15})$
8. $(Ca_{0.99}Fe_{0.02})_{\Sigma 1.01}(Ti_{0.80}Al_{0.19})_{\Sigma 0.99}(Si_{0.99}Al_{0.01})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.84}F_{0.16})$
9. $(Ca_{0.99}Fe_{0.02})_{\Sigma 1.01}(Ti_{0.80}Al_{0.20})_{\Sigma 1.00}(Si_{0.99}Al_{0.01})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.83}F_{0.17})$
10. $(Ca_{0.99}Fe_{0.02})_{\Sigma 1.01}(Ti_{0.79}Al_{0.20})_{\Sigma 0.99}(Si_{0.99}Al_{0.01})_{\Sigma 1.00}O_4(O_{0.82}F_{0.18})$

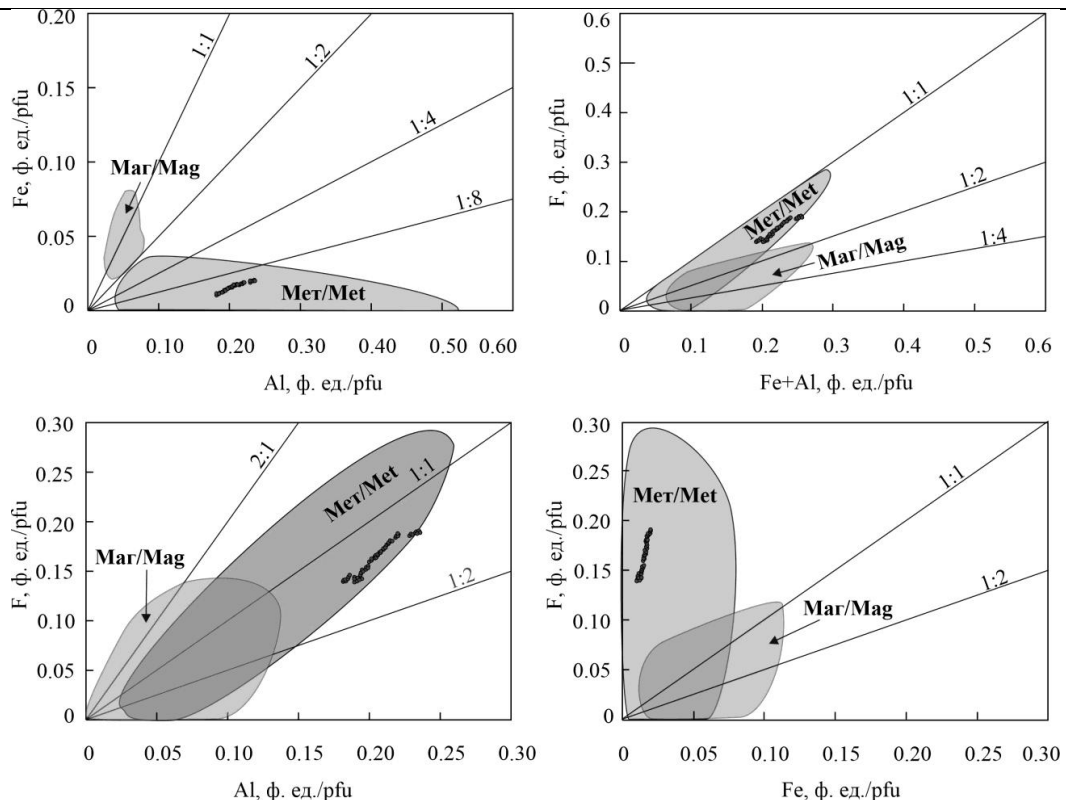


Рис. 3. Зависимость содержаний Al и Fe, Al и F, Fe+Al и F, Fe и F в титаните (ф.ед).
Поля состава титанита: Маг – титанит магматических пород, Мет – титанит метаморфических пород [Kowallis et al., 2022] /

Fig. 3. Dependence of the contents of Al-Fe, Al-F, Fe+Al-F, Fe-F in titanite (ph. units).
Fields of titanite composition: Mag – titanite of igneous rocks, Met – titanite of metamorphic rocks [Kowallis et al., 2022]

По содержанию глинозема изученный титанит (4,78–6,20 мас. %) максимально близок к титаниту (Al_2O_3 3,55–5,16 мас. %) из сланцев Иртышской Зоны смятия, формирование которого происходило в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма [Наставко и др., 2024] и вторичному титаниту (Al_2O_3 до 7,72 мас. %) метагранитов орогена Сулу (Восточно-Центральный Китай), образовавшемуся в результате преобразования породы в условиях амфиболитовой фации метаморфизма [Chen et al., 2016].

По всей видимости, фтор-глиноземистый титанит из гранитов турочакского комплекса был сформирован в результате незначительных метаморфических преобразований. На это указывают: отношения Fe/Al (составляющее менее 1:2) и $(Fe+Al)/F$ (близкое к 1:1 и почти всегда $> 1:2$) в составе титанита, а также его приуроченность к хлоритизированным лейстам биотита. Таким образом, изученный титанит является продуктом низкоградного распада биотита, являясь при этом основным минералом, концентрирующим биотитовый титан [Tulloch, 1979].

Выводы

В результате проведенных исследований установлено наличие в гранитах третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса фтор-глиноземистого титанита (Al_2O_3 4,78–6,20 мас. %, F 1,49–2,03 мас. %). Обнаруженный титанит характеризуется отношениями Fe/Al и $(Fe+Al)/F$ типичными для титанита метаморфического генезиса.

Формирование титанита, на наш взгляд, является результатом низкоградного преобразования породы, в частности распада биотита.

Таким образом, изучение состава титанита и важных индикаторных отношений (Fe/Al и $(Fe+Al)/F$) позволит заранее узнать его природу и оценить возможность его применения в целях решения геохронологических задач.

Литература

1. Бабин Г.А., Гусев Н.И., Юрьев А.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-45 – Новокузнецк. Объяснительная записка. СПб., 2007. – 665 с.
2. Балтыбаев Ш.К., Саватенков В.М., Петракова М.Е. T-t эволюция раннепротерозойских пород Северного Приладожья по данным изучения U-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd систем в минералах. // Геодинамика и тектонофизика. – 2024. – Т. 15. № 3. – Art. No. 0759. DOI: 10.5800/GT-2024-15-3-0759.
3. Вах А.С., Авченко О.В., Карабцов А.А., Степанов В.А. Первая находка гротита в золоторудных месторождениях. // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 428. № 3. – С. 353–357.
4. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Позднекарбонные гипабиссальные граниты и лейкограниты Большого Кавказа: вопросы петрогенезиса. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 117–130. DOI: 10.46698/VNC.2024.94.67.009.
5. Гусев А.И. Высоко-фракционированные гранитоиды Пшишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 96–111. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007.
6. Гусев А.И., Коробейников А.Ф. Петро-геохимические особенности и рудоносность двух подтипов анорогенных гранитоидов Горного Алтая. // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. № 1. – С. 27–35.
7. Дорошкевич А.Г., Шарьгин В.В., Пономарчук А.В., Изох А.Э., Избродин И.А. и др. Новые данные о возрасте пород пироксенитовых массивов р. Хани (Алдано-Становой щит). // Геосферные исследования. – 2022. – № 3. – С. 6–26. DOI: 10.17223/25421379/24/1.
8. Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. Включения гротита в цирконе из гранитоидов.

дов кристаллического фундамента Южного Ямала. // Вестник МГТУ. – 2019. – Т. 22. № 1. – С. 5–11. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-5-11.

9. Коновалова Е.В., Холоднов В.В., Прибавкин С.В., Замятин Д.А. Элементы-минерализаторы (сера и галогены) в апатитах Шарташского гранитного массива и Березовского золоторудного месторождения. // Литосфера. – 2013. – № 6. – С. 65–72.

10. Кориш Е.Х., Савко К.А., Базиков Н.С., Ларионов А.Н. Возраст сиенитов палеопротерозойского дубравинского супрасубдукционного щелочно-карбонатитового комплекса Курского блока Сарматии. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2024. – № 1. – С. 4–13. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2023/4/4-13.

11. Наставко Е.В., Федосюк Г.А., Змеев Б.Ю. Гротит из сланцев Иртышской зоны смятия (Восточный Казахстан). // Вестник геонаук. – 2024. – № 12(360). – С. 3–11. DOI: 10.19110/geov.2024.12.1.

12. Скублов С.Г., Мамыкина М.Е., Ризванова Н.Г. U-Pb возраст и редкоэлементный состав титанита из гранитов Белокурихинского массива, Горный Алтай. // Вестник МГТУ. – 2021. – Т. 24. № 2. – С. 168–177. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-168-177.

13. Тарарин И.А., Бадрединов З.Г., Чубаров В.М., Шарова О.И. Гротит гранат-слюдистых кристаллических сланцев шихтинской свиты Срединнокамчатского массива. // Доклады Академии наук. – 2011. – Т. 438. № 6. – С. 809–812.

14. Castelli D., Rubatto D. Stability of Al- and F-rich titanite in metacarbonate: petrologic and isotopic constraints from a polymetamorphic eclogitic marble of the internal Sesia Zone (Western Alps). // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2002. – Vol. 142. No. 6. – pp. 627–639. DOI: 10.1007/s00410-001-0317-6.

15. Chen Y.X., Zhou K., Zheng Y.F., Gao X.Y., Yang Y. Polygenetic titanite records the composition of metamorphic fluids during the exhumation of ultrahigh-pressure metagranite in the Sulu orogen. // Journal of Metamorphic Geology. – 2016. – Vol. 34. No. 6. – pp. 573–594. DOI: 10.1111/jmg.12194.

16. Erdmann S., Wang R., Huang F. et al. Titanite: A potential solidus barometer for granitic magma systems. // Comptes Rendus Geoscience. – 2019. – Vol. 351. – pp. 551–561. DOI: 10.1016/j.crte.2019.09.002.

17. Franz G., Spear F. Aluminous titanite (sphene) from the Eclogite Zone, south-central Tauern Window, Austria. // Chemical Geology. – 1985. – Vol. 50. No. 1/3. – pp. 33–46.

18. Frost B.R., Chamberlain K.R., Schumacher J.C. Sphene (titanite): phase relations and role as a geochronometer. // Chemical Geology. – 2001. – Vol. 172. No. 1-2. – pp. 131–148.

19. Hayden L.A., Watson E.B., Wark D.A. A thermobarometer for sphene (titanite). // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2008. – Vol. 155. Issue 4. – pp. 529–540. DOI: 10.1007/s00410-007-0256-y.

20. Kasay G.M., Borst A.M., Giebel J.R. et al. Petrogenesis and geodynamic setting of the Bingu alkaline-carbonatite complex, DRC: Constraints from petrography, geochemistry, C-O isotopes and U-Pb geochronology. // Precambrian Research. – 2024. – Vol. 408. – Art. No. 107421. DOI: 10.1016/j.precamres.2024.107421.

21. Kawohl A., Frimmel H.E., Whymark W.E. et al. Geology, geochemistry, and apatite/titanite U-Pb geochronology of ca. 1.88 Ga alkaline ultrabasic dykes in the Southern Province near Sudbury, Ontario. // Canadian Journal of Earth Sciences. – 2023. – Vol. 60. No. 1. – pp. 62–77. DOI: 10.1139/cjes-2022-0030.

22. Kowallis B.J., Christiansen E.H., Dorais M.J. et al. Variation of Fe, Al, and F Substitution in Titanite (Sphene). // Geosciences (Switzerland). – 2022. – Vol. 12. No. 6. – Art. No. 229. DOI: 10.3390/geosciences12060229.

23. Li Z., Guo H., Zeng W. et al. Geochemical, U-Pb Age and Nd-Isotopic Characteristics of Titanite in Alkaline Rocks from Dazhuang Nb-REE Deposit in Southern Margin of North China Craton. // Earth Science. – 2022. – Vol. 47. No. 4. – pp. 1415–1434. DOI: 10.3799/dqkx.2021.126.

24. Markl G., Piazzolo S. Stability of high-Al titanite from low-pressure calcsilicates in light of fluid and host-rock composition. // American Mineralogist. – 1999. – Vol. 84. No. 1/2. – pp. 37–47.

25. Oberti R., Smith D.C., Rossi G., Caucia F. The crystal chemistry of high-aluminium titanites. // *European Journal of Mineralogy*. – 1991. – Vol. 3. Issue 5. – pp. 777–792. DOI: 10.1127/ejm/3/5/0777.
26. Qiu E., Zhang Yu., Larson K. P. Dating Subhorizontal Ductile Fabric in the Feidong Complex via Zircon and Titanite U–Pb Geochronology: Insights into Middle Triassic Transpressional Deformation along the Southern Tan-Lu Fault Zone. // *Lithosphere*. – 2025. – Vol. 2025. No. 1. DOI: 10.2113/2025/lithosphere_2024_224.
27. Scibiorski E.A., Cawood P.A. Titanite as a petrogenetic indicator. // *Terra Nova*. – 2022. – Vol. 34. No. 3. – pp. 177–183. DOI: 10.1111/ter.12574.
28. Tropper P., Manning C.E., Essene E.J. The substitution of Al and F in titanite at high pressure and temperature: experimental constraints on phase relations and solid solution properties. // *Journal of Petrology*. – 2002. – Vol. 43. No. 10. – pp. 1787–1814. DOI: 10.1093/petrology/43.10.1787.
29. Tulloch A.J. Secondary Ca-Al silicates as low-grade alteration products of granitoid biotite. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1979. – Vol. 69. No. 2. – pp. 105–117. DOI: 10.1007/bf00371854.
30. Van Schijndel V., Cutts K.A., Pereira I. et al. Minor minerals, major implications: using key mineral phases to unravel the formation and evolution of Earth's crust. // *Geological Society Special Publication*. – 2024. – Vol. 537. No. 1. – pp. 1–7. DOI: 10.1144/sp537-2023-110.
31. Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. // *Mineralogical Magazine*. – 2021. – Vol. 85. – pp. 291–320.
32. Wei R., Wang Y., Hu Q. et al. Mineral Chemistry and In Situ LA-ICP-MS Titanite U-Pb Geochronology of the Changba-Lijiagou Giant Pb-Zn Deposit, Western Qinling Orogen: Implications for a Distal Skarn Ore Formation. // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14. No. 11. – Art. No. 1123. DOI 10.3390/min14111123.

References

1. Babin G.A., Gusev N.I., Yuryev A.A. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000. (third generation). Altai-Sayan Series. Sheet N-45. Novokuznetsk. Explanatory note. Saint Petersburg. 2007. 665 p. (In Russ.)
2. Baltybaev Sh.K., Savatenkov V.M., Petrakova M.E. T-t evolution of Early Proterozoic rocks of the Northern Ladoga region according to the study of U-Pb, Rb-Sr and Sm-Nd systems in minerals. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2024. Vol. 15. Issue 3. Art. No. 0759. DOI: 10.5800/GT-2024-15-3-0759. (In Russ.)
3. Vakh A.S., Avchenko O.V., Karabtsov A.A., Stepanov V.A. The first find of grothite in gold deposits. *Doklady Earth Sciences*. 2009. Vol. 428. No. 3. pp. 353–357. (In Russ.)
4. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Late Carboniferous hypabyssal granites and leucogranites of the Greater Caucasus: petrogenesis issues. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 117–130. (In Russ.)
5. Gusev A.I. High-fractionation granitoids of Pshish rare metal of district the Northern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 96–111. (In Russ.)
6. Gusev A.I., Korobeynikov A.F. Petro-geochemical features and ore-bearing capacity of two subtypes of anorogenic granitoids of Gornyy Altai. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*. 2014. Vol. 325. No. 1. pp. 27–35. (In Russ.)
7. Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Ponomarchuk A.V., Izokh A.E., Izbrodin I.A. et al. New age data for rocks of Khani intrusions (Aldan-Stanovoy shield). *Geosphere Research*. 2022. No. 3. pp. 6–26. DOI: 10.17223/25421379/24/1. (In Russ.)
8. Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Hiller V.V. The inclusion of grothite in the zircon from granitoids of the crystalline basement of the Southern Yamal Peninsula. *Vestnik MSTU*. 2019. Vol. 22. No. 1. pp. 5–11. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-5-11. (In Russ.)
9. Konovalova E.V., Kholodnov V.V., Pribavkin S.V., Zamyatin D.A. Chemical components of mineralization (sulfur and halogens) in apatites of Shartash granite massive and Berezovsk gold deposit. *Lithosphere*. 2013. No. 6. pp. 65–72. (In Russ.)

10. Korish E.Kh., Savko K.A., Bazikov N.S., Larionov A.N. The age of the Paleoproterozoic Dubravinsky suprasubduction alkali-carbonatite complex syenites, Kursk block, Sarmatia. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2024. No. 1. pp. 4–13. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2023/4/4-13. (In Russ.)
11. Nastavko E.V., Fedosyuk G.A., Zmeev B.Yu. Grothite from schists of the irtysh shear zone (East Kazakhstan). *Vestnik of Geosciences*. 2024. No. 12(360). pp. 3–11. DOI: 10.19110/geov.2024.12.1. (In Russ.)
12. Skublov S.G., Mamykina M.E., Rizvanova N.G. U-Pb age and rare-element composition of titanite from granites of the Belokurikhinsky massif, Altai Mountains. *Vestnik of MSTU*. 2021. Vol. 24. No. 2. pp. 168–177. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-168-177. (In Russ.)
13. Tararin I.A., Badredinov Z.G., Chubarov V.M., Sharova O.I. Grothite from garnet-micaceous crystalline schist of the Shikhtinskaya suite in the middle Kamchatka massif. *Doklady Earth Sciences*. 2011. Vol. 438. No. 6. pp. 809–812. (In Russ.)
14. Castelli D., Rubatto D. Stability of Al- and F-rich titanite in metacarbonate: petrologic and isotopic constraints from a polymetamorphic eclogitic marble of the internal Sesia Zone (Western Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2002. Vol. 142. No. 6. pp. 627–639. DOI: 10.1007/s00410-001-0317-6.
15. Chen Y.X., Zhou K., Zheng Y.F., Gao X.Y., Yang Y. Polygenetic titanite records the composition of metamorphic fluids during the exhumation of ultrahigh-pressure metagranite in the Sulu orogen. *Journal of Metamorphic Geology*. 2016. Vol. 34. No. 6. pp. 573–594. DOI: 10.1111/jmg.12194.
16. Erdmann S., Wang R., Huang F. et al. Titanite: A potential solidus barometer for granitic magma systems. *Comptes Rendus Geoscience*. 2019. Vol. 351. pp. 551–561. DOI: 10.1016/j.crte.2019.09.002.
17. Franz G., Spear F. Aluminous titanite (sphene) from the Eclogite Zone, south-central Tauern Window, Austria. *Chemical Geology*. 1985. Vol. 50. No. 1/3. pp. 33–46.
18. Frost B.R., Chamberlain K.R., Schumacher J.C. Sphene (titanite): phase relations and role as a geochronometer. *Chemical Geology*. 2001. Vol. 172. No. 1-2. pp. 131–148.
19. Hayden L.A., Watson E.B., Wark D.A. A thermobarometer for sphene (titanite). *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2008. Vol. 155. Issue 4. pp. 529–540. DOI: 10.1007/s00410-007-0256-y.
20. Kasay G.M., Borst A.M., Giebel J.R. et al. Petrogenesis and geodynamic setting of the Bingo alkaline-carbonatite complex, DRC: Constraints from petrography, geochemistry, C-O isotopes and U-Pb geochronology. *Precambrian Research*. 2024. Vol. 408. Art. No. 107421. DOI: 10.1016/j.precamres.2024.107421.
21. Kawohl A., Frimmel H.E., Whymark W.E. et al. Geology, geochemistry, and apatite/titanite U–Pb geochronology of ca. 1.88 Ga alkaline ultrabasic dykes in the Southern Province near Sudbury, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 60. No. 1. pp. 62–77. DOI: 10.1139/cjes-2022-0030.
22. Kowallis B.J., Christiansen E.H., Dorais M.J. et al. Variation of Fe, Al, and F Substitution in Titanite (Sphene). *Geosciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12. No. 6. Art. No. 229. DOI: 10.3390/geosciences12060229.
23. Li Z., Guo H., Zeng W. et al. Geochemical, U-Pb Age and Nd-Isotopic Characteristics of Titanite in Alkaline Rocks from Dazhuang Nb-REE Deposit in Southern Margin of North China Craton. *Earth Science*. 2022. Vol. 47. No. 4. pp. 1415–1434. DOI: 10.3799/dqkx.2021.126.
24. Markl G., Piazzolo S. Stability of high-Al titanite from low-pressure calcsilicates in light of fluid and host-rock composition. *American Mineralogist*. 1999. Vol. 84. No. 1/2. pp. 37–47.
25. Oberti R., Smith D.C., Rossi G., Caucia F. The crystal chemistry of high-aluminium titanites. *European Journal of Mineralogy*. 1991. Vol. 3. Issue 5. pp. 777–792. DOI: 10.1127/ejm/3/5/0777.
26. Qiu E., Zhang Yu., Larson K. P. Dating Subhorizontal Ductile Fabric in the Feidong Complex via Zircon and Titanite U–Pb Geochronology: Insights into Middle Triassic Transpressional Deformation along the Southern Tan-Lu Fault Zone. *Lithosphere*. 2025. Vol. 2025. No. 1. DOI: 10.2113/2025/lithosphere_2024_224.

27. Scibiorski E.A., Cawood P.A. Titanite as a petrogenetic indicator. *Terra Nova*. 2022. Vol. 34. No. 3. pp. 177–183. DOI: 10.1111/ter.12574.
28. Tropper P., Manning C.E., Essene E.J. The substitution of Al and F in titanite at high pressure and temperature: experimental constraints on phase relations and solid solution properties. *Journal of Petrology*. 2002. Vol. 43. No. 10. pp. 1787–1814. DOI: 10.1093/petrology/43.10.1787.
29. Tulloch A.J. Secondary Ca-Al silicates as low-grade alteration products of granitoid biotite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1979. Vol. 69. No. 2. pp. 105–117. DOI: 10.1007/bf00371854.
30. Van Schijndel V., Cutts K.A., Pereira I. et al. Minor minerals, major implications: using key mineral phases to unravel the formation and evolution of Earth's crust. *Geological Society Special Publication*. 2024. Vol. 537. No. 1. pp. 1–7. DOI: 10.1144/sp537-2023-110.
31. Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. pp. 291–320.
32. Wei R., Wang Y., Hu Q. et al. Mineral Chemistry and In Situ LA-ICP-MS Titanite U-Pb Geochronology of the Changba-Lijiagou Giant Pb-Zn Deposit, Western Qinling Orogen: Implications for a Distal Skarn Ore Formation. *Minerals*. 2024. Vol. 14. No. 11. Art. No. 1123. DOI 10.3390/min14111123.