



Пирофанит и манганоильменит в гранитах третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса (г. Большой Иконостас, Горный Алтай)

Е. В. Наставко, Т. В. Лешуков, Б. Ю. Змеев, А. С. Слесарев, Г. А. Федосюк

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

evnastavko@yandex.ru

В гранитах третьей фазы внедрения турочакского комплекса ($\gamma D_1 t$) установлено одновременное присутствие двух минералов группы ильменита, отличающихся размерами, расположением в породе и химическим составом. Совместно с ними встречаются зерна магнетита. Манганоильменит ($MnO - 17.95 - 22.68$ мас. %) встречается в виде идиоморфных зерен размером $150 - 200$ мкм, приуроченных к лейстам биотита. Железомарганцевое отношение варьирует от 1.18 до 1.63 . Пирофанитовый минал составляет $38 - 45$ %, редко присутствует гематитовый минал до (2 %). Общая формула имеет следующий вид: $(Fe^{2+}_{0.53-0.60}Mn_{0.38-0.45}Fe^{3+}_{0-0.02})_{\Sigma 1.00-1.01}Ti_{0.99-1.00}O_3$. Пирофанит ($MnO - 24.35 - 27.18$ мас. %) представлен мелкими (до 50 мкм) идиоморфными зернами, располагающимися в межзерновом пространстве. Железомарганцевое отношение составляет менее единицы ($FeO/MnO -$ от 0.74 до 0.93). Пирофанитовый минал составляет от 52 до 58 %, гематитовый минал отсутствует. Обобщенная формула — $(Mn_{0.52-0.58}Fe^{2+}_{0.42-0.48})_{\Sigma 1.00}Ti_{1.00}O_3$. Магнетит в породе встречается в виде изометричных идиоморфных зерен, главным образом приуроченных к биотиту, размером не более 40 мкм. Единичные зерна встречаются в плагиоклазе, где их размер достигает $150 - 180$ мкм. Магнетиту свойственно постоянное присутствие титана ($TiO_2 - 5.87 - 7.30$ мас. %) и марганца (до 0.20 %), количество общего железа FeO составляет $92.59 - 94.02$ мас. %. Общая формула магнетита — $Fe^{2+}_{1.16-1.20}(Fe^{3+}_{1.60-1.68}Ti_{0.16-0.20})_{\Sigma 1.80-1.84}O_4$. Активность кислорода, рассчитанная для пары «магнетит — манганоильменит», составляет от -26 до -24 , а для пары «магнетит — пирофанит» — -36 до -32 , что свидетельствует о восстановительных условиях при их кристаллизации.

Ключевые слова: гранит, манганоильменит, пирофанит, магнетит, турочакский комплекс, Горный Алтай

Pyrophanite and manganoilmenite in granites of the third phase of the intrusion of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex (Bolshoy Ikonostas Mountain, Gorny Altai)

E. V. Nastavko, T. V. Leshukov, B. Yu. Zmeev, A. S. Slesarev, G. A. Fedosyuk

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The simultaneous presence of two minerals of the ilmenite group has been established in the granites of the third phase of the Turochak complex intrusion ($\gamma D_1 t$). They differ in size, location in the rock and chemical composition. Magnetite grains occur together with them. Manganoilmenite ($MnO 17.95 - 22.68$ wt.%) occurs as euhedral grains $150 - 200 \mu m$ in size, confined to biotite laths. The iron-manganese ratio varies from 1.18 to 1.63 . The pyrophanite minal makes up $38 - 45\%$, hematite minal is rarely present (up to 2%). The general formula is as follows: $(Fe^{2+}_{0.53-0.60}Mn_{0.38-0.45}Fe^{3+}_{0-0.02})_{\Sigma 1.00-1.01}Ti_{0.99-1.00}O_3$. Pyrophanite ($MnO 24.35 - 27.18$ wt.%) is represented by small (up to $50 \mu m$) euhedral grains located in the intergranular space. The iron-manganese ratio is less than unity (FeO/MnO from 0.74 to 0.93). The pyrophanite end-member makes up from 52 to 58% , the hematite end-member is absent. The generalized formula is $(Mn_{0.52-0.58}Fe^{2+}_{0.42-0.48})_{\Sigma 1.00}Ti_{1.00}O_3$. Magnetite in the rock occurs as isometric euhedral grains, mainly confined to biotite, no more than $40 \mu m$ in size. Single grains are found in plagioclase; their size reaches $150 - 180 \mu m$. Magnetite is characterized by the constant presence of titanium ($TiO_2 5.87 - 7.30$ wt.%) and manganese (up to 0.20%), the amount of total iron is $FeO 92.59 - 94.02$ wt.%. The general formula of magnetite is $Fe^{2+}_{1.16-1.20}(Fe^{3+}_{1.60-1.68}Ti_{0.16-0.20})_{\Sigma 1.80-1.84}O_4$. The oxygen activity calculated for the "magnetite-manganoilmenite pair is from -26 to -24 , and for the magnetite-pyrophanite pair -36 to -32 , which indicates reducing conditions during their crystallization.

Keywords: granite, manganoilmenite, pyrophanite, magnetite, Turochak complex, Altai Mountains

Для цитирования: Наставко Е. В., Лешуков Т. В., Змеев Б. Ю., Слесарев А. С., Федосюк Г. А. Пирофанит и манганоильменит в гранитах третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса (г. Большой Иконостас, Горный Алтай) // Вестник геонаук. 2026. 2(374). С. 3–10. DOI: 10.19110/geov.2026.2.1

For citation: Nastavko E. V., Leshukov T. V., Zmeev B. Yu., Slesarev A. S., Fedosyuk G. A. Pyrophanite and manganoilmenite in granites of the third phase of the intrusion of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex (Bolshoy Ikonostas Mountain, Gorny Altai). Vestnik of Geosciences, 2026, 2(374), pp. 3–10. DOI: 10.19110/geov.2026.2.1

Введение

Акцессорные минералы могут служить индикаторами многих процессов, а их исследование позволяет делать выводы о связи оруденения с магматическим комплексом (Ляхович, 1979). Манганоильменит является промежуточным членом изоморфного ряда ильменит (FeTiO_3)—пирофанит (MnTiO_3), «содержание» марганца в нем превышает 13 мас. % (Минералы, 1967).

Пирофанит и манганоильменит являются второстепенными и акцессорными минералами марганцевых месторождений (Смолянинова, Борисовский, 1984; Старикова, Завилейский, 2010; Калугин, Брусницын, 2012; Савельев, 2014; Pattnaik, Majhi, 2024; Mušlan et al., 2025), щелочных комплексов (Немов, 2017; Попов и др., 2017; Shubin, Kogarko, 2022), кимберлитов (Филиппов, Мальков, 2005; Каминский, Белоусов, 2009; Путинцева, Спиридонов, 2017), метаморфизованных железных руд (Zaccarini et al., 2004), скарнов и приуроченных к ним руд (Ятимов и др., 2024; Voudouris et al., 2013; Espeche, Lira, 2020), ультраосновных и основных пород (Самигуллин и др., 2024). В гранитных породах данные минералы встречаются довольно часто, при этом информация об их строении и составе редко рассмотрена достаточно детально (Елбаев и др., 2021), в большинстве работ носит ограниченный характер (Sasaki et al., 2003; Sami et al., 2004; Xie et al., 2004; Tarassova, Tarassov, 2012; Полякова, 2013).

Вопросы состава и генетических особенностей пирофанита и манганоильменита в гранитоидах до сих пор являются открытыми и дискуссионными. На сегодняшний день предполагается несколько факторов, влияющих на их присутствие в гранитах. Так, например, в 60-х гг. XX века появление марганецсодержащего ильменита и пирофанита связывали с низкой температурой кристаллизации (Buddington, Lindsley, 1964; Anderson, 1968). Позже появилась точка зрения, что причиной является магматическая дифференциация (Багдасаров, 1986; Sasaki et al., 2003). Кроме того, основным фактором рассматривался привнос марганца гидротермальными растворами (Тарасова, Тарасов, 1998). В начале XXI века нахождение манганоильменита и пирофанита в гранитах стали связывать с окислительной обстановкой (Shroeder et al., 2002; Rene, 2011).

При петрографическом изучении гранитоидов третьей фазы внедрения турочакского комплекса авторами обнаружены пирофанит и манганоильменит. В статье приводятся данные об их химическом составе, морфологии зерен, а также оценка температуры и активности кислорода при гранитообразовании.

Объект и методы исследования

Исследование минералов проводилось в полированных шлифах с углеродным напылением. Химический

Рис. 1. Схема расположения и строения турочакского массива (по: Государственная..., 2007):

1–3 — разрывные нарушения: 1, 2 — достоверные: 1 — главные, 2 — прочие, 3 — предполагаемые; 4 — кебезенский плагинейсово-амфиболитовый комплекс (PR_2kb); 5 — эсконгинская свита (E_1es), 6 — усть-анзасско-манжерокская свита (E_1um); 7 — убинско-тырганская группа свит (E_1ut); 8 — сийская терригенно-карбонатная свита (E_1ss); 9 — еландинско-тандошинская группа свит ($\text{E}_{2-3\text{et}}$); 10 — алзасская свита (O_1al); 11 — ишпинская свита (O_1is); 12 — нырнинская свита ($\text{D}_{1-2\text{nr}}$), 13 — кротинско-саганская группа свит (D_2ks); 14 — саракошинский диорит-тоналит-плагиигранитовый комплекс (γpEs), 15 — югалинский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс ($\text{q}\delta\text{-}\gamma\delta\text{D}_{1\text{ju}}$); 16 — турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс (D_1t): а — порфировидные биотитовые граниты и лейкограниты, граносиениты, аляскиты, аплитовидные граниты ($\gamma\text{D}_{1\text{t}}$), б — порфировидные биотитовые умеренно-щелочные граниты и лейкограниты ($\varepsilon\gamma\text{-}\varepsilon\gamma\text{D}_{1\text{t}}$); 17 — топольнинский диорит-гранодиоритовый комплекс ($\gamma\text{D}_{2\text{tp}}$); 18 — озерно-аллювиальные четвертичные отложения (Q_{III}); 19 — место отбора проб

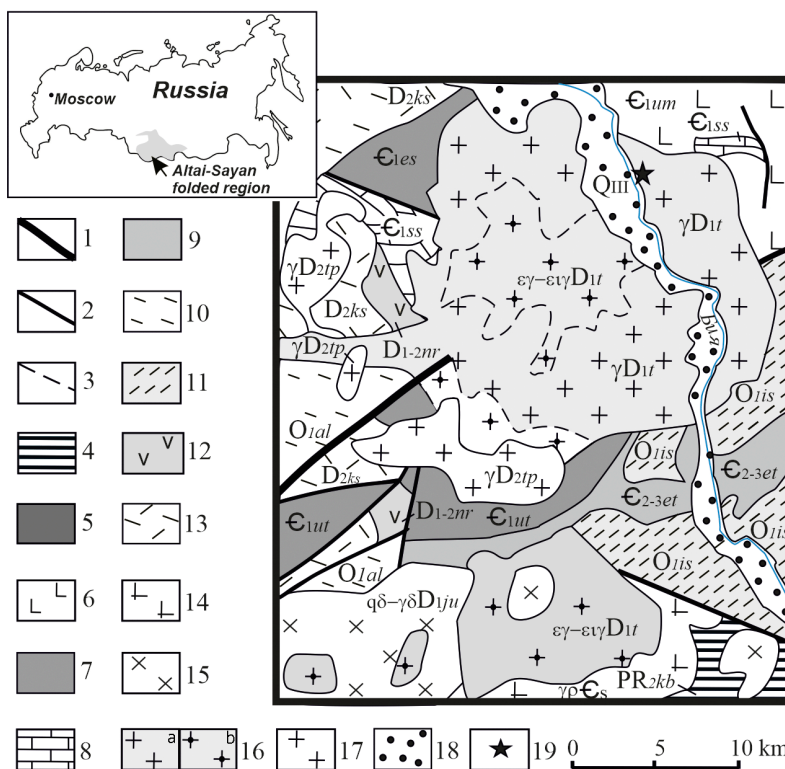


Fig. 1. Scheme of the location and structure of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex (according to: State..., 2007):

1–3 — faults: 1, 2 — reliable: 1 — main, 2 — other, 3 — inferred; 4 — Kebezen plagiogneiss-amphibolite complex (PR_2kb); 5 — Eskongin suite (E_1es), 6 — Ust-Anzas-Manzherok suite (E_1um); 7 — Uba-Tyrgan group of suites (E_1ut); 8 — Syys terrigenous-carbonate suite (E_1ss); 9 — Elandin-Tandoshin group of suites ($\text{E}_{2-3\text{et}}$); 10 — Alzas suite (O_1al); 11 — Ishpin suite (O_1is); 12 — Nyrnin suite ($\text{D}_{1-2\text{nr}}$), 13 — Krotin-Sagan group of suites (D_2ks); 14 — Sarakokshin diorite-tonalite-plagiogranite complex (γpEs), 15 — Yugalin gabbro-diorite-granodiorite complex ($\text{q}\delta\text{-}\gamma\delta\text{D}_{1\text{ju}}$); 16 — Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex (D_1t): a — porphyritic biotite granites and leucogranites, granosyenites, alaskites, aplite-like granites ($\gamma\text{D}_{1\text{t}}$), b — porphyritic biotite moderately alkaline granites and leucogranites ($\varepsilon\gamma\text{-}\varepsilon\gamma\text{D}_{1\text{t}}$); 17 — Topolnin diorite-granodiorite complex ($\gamma\text{D}_{2\text{tp}}$); 18 — lacustrine-alluvial Quaternary deposits (Q_{III}); 19 — sampling site



состав минералов, их однородность, морфология, степень идиоморфизма, взаимоотношение с другими минералами изучались при помощи 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.

Всего произведено 92 определения химического состава: 78 минералов группы ильменита (манганоильменит — 42, пирофанит — 36) из 10 образцов гранитов и 14 — магнетита в 7 образцах гранитов. В работе приведено по 7 определений каждого минерала. На диаграмме «ильменит — гематит — пирофанит» приведены фигуративные точки состава для всех 78 определений.

Отбор проб гранитов (9 проб из 10 образцов) осуществлен на расстоянии 35—75 метров из коренных выходов горы Большой Иконостас. 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 образцов выполнено петрографическое описание и кристаллохимический пересчет состава минералов с помощью программного обеспечения PetroExplorer v.3.2, MineralCalc v.1.1 (Кориневский, 2015).

Для оценки показателя кислородного потенциала использованы магнетит-ильменитовая и магнетит-пирофанитовая пары с применением программ ILMAT 1.20 (Lepage, 2003) и MagMin_PT (Gündüz, Asan, 2023). В первой паре минералы, выбранные для расчета, располагаются в общих лейстах биотита. Минералы второй пары совместно в биотите не встречаются. Поэтому для расчета выбиралась пара, в которой магнетит располагается в биотите или плагиоклазе, а пирофанит — на границе биотита и плагиоклаза.

Краткая характеристика турочакского комплекса

Раннедевонский турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс ($\gamma D_1 t$) относится к Горно-Алтайскому сегменту, который является редуцированной частью Алтае-Минусинского ранне- и среднедевонского магматического пояса Алтае-Саянской складчатой области (рис. 1). Формирование пояса происходило в условиях активной континентальной окраины кордильерского типа.

Турочакский массив является петротипом турочакского комплекса и имеет трехфазное строение. Породы первых двух фаз внедрения, суммарно составляющие не более 10 %, слагают центральную часть массива. Первая и вторая фазы представлены меланогранитами и гранитами, которые по мере приближения к периферии массива сменяются субщелочными лейкогранитами. Третья фаза внедрения, составляющая до 90 %, представленная неравнозернистыми, порфиридовидными и аплитовидными биотитовыми, биотит-мусковитовыми лейкогранитами, умеренно щелочными лейкогранитами и аляскитами, слагает периферические части массива. Для лейкогранитов данной фазы характерно повышенное содержание кварца (до 50 % в аляскитах), отсутствие амфибола, а также преобладание биотита над мусковитом

и калиевого полевого шпата над кислым плагиоклазом. Аксессуары: магнетит, ильменит, титанит, апатит и циркон. Отмечено спорадическое присутствие граната, ортита и монацита.

Турочакские граниты и лейкограниты по своему химическому составу относятся к породам нормальной и умеренно щелочной серии (SiO_2 — 73.40—76.41 %, Al_2O_3 — 12.08—13.65 %, Na_2O — 3.40—4.07 %, K_2O — 4.00—4.78 %) и близки к высокоглиноземистым гранитам S-типа (Государственная..., 2007). По содержанию Y, Nb, Ta, Yb, и Rb граниты и лейкограниты комплекса соответствуют островодужным и коллизионным гранитоидам, приближаясь к составу внутриплитных образований. А. И. Гусев рассматривает данные гранитоиды как двуполевошпатовые субсольвусные граниты A-типа (Гусев, 1994).

Возраст комплекса, полученный U-Pb-методом по цирконам из порфиридовидных биотитовых гранитов Турочакского массива горы Большой Иконостас (390 ± 6 млн лет) и умеренно-щелочных гранитов горы Цаган (400 ± 4 млн лет), соответствует раннедевонскому (Государственная..., 2007).

Минералого-петрографическая характеристика гранитов третьей фазы внедрения турочакского комплекса

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, порфиридовидную, гипидиоморфнозернистую структуру и массивную текстуру. Под микроскопом устанавливается типичная гранитная, местами микропегматитовая структура. Минералого-петрографические особенности пород показаны на рисунке 2.

Породы сложены калиевым полевым шпатом (35—40 %), плагиоклазом альбитового состава ((An_{0-3}) 25—30 %) и кварцем (25—30 %). Для калиевого полевого шпата характерна микроклиноватая решетка, что позволяет отнести его к микроклину. Кварц ксеноморфен, его зерна заполняют интерстиции. Слюда представлена биотитом, количество которого достигает 10 %, и мусковитом (до 1 %). Для пород характерен широкий набор аксессуарных минералов: апатита, циркона, титанита, магнетита, минералов группы эпидота (алланит-Ce с каймой из редкоземельного эпидота и эпидот) — и группы ильменита (пирофанит и манганоильменит). Вторичные изменения породы представлены слабой хлоритизацией биотита и незначительной сосюритизацией плагиоклаза. Аксессуарные минералы приурочены преимущественно к хлоритизированным лейстам биотита. Кроме собственно марганцевых минералов — пирофанита и ильменита — в породах встречается алланит-(Ce), также обогащенный марганцем, содержание MnO в нем составляет от 2.86 до 4.09 мас. % (Наставко и др., 2024).

Манганоильменит представлен идиоморфными зёрнами, встречающимися исключительно в слабохлоритизированном биотите, размер зерен достигает 150—200 мкм (рис. 3, а—е).

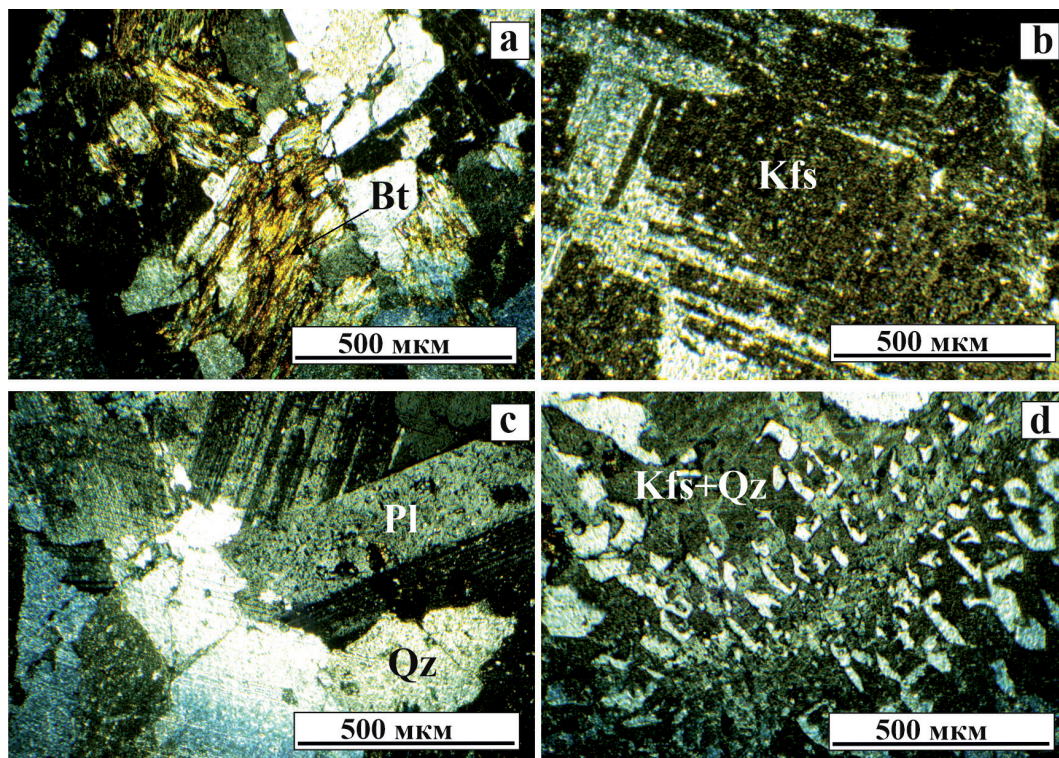


Рис. 2. Петрографические особенности гранитов.

Фото с анализатором. Индексы минералов здесь и далее приводятся по Warr, 2021: Bt — биотит, Kfs — калиевый полевой шпат, Pl — плагиоклаз, Qz — кварц

Fig. 2. Petrographic features granites.

Photo with analyzer. The symbols used here and throughout the text are given according to Warr, 2021: Bt — biotite, Kfs — potassium feldspar, Pl — plagioclase, Qz — quartz

Пирофанит встречается в породе в виде идиоморфных зерен, размер которых значительно меньше, чем у манганоильменита, и не превышает 50 мкм. Зерна располагаются в межзерновом пространстве биотита и кварца или биотита и полевых шпатов (рис. 3, a, b, d–h).

Магнетит в виде идиоморфных изометричных зерен размером до 35–40 мкм встречается в лейстах биотита (рис. 3, d, f–h), а также в плагиоклазе, где размер зерен достигает 150–180 мкм (рис. 3, g).

Результаты исследований и их обсуждение

При помощи электронного микроскопа было установлено, что в исследуемых гранитах одновременно с магнетитом присутствуют различные по размерам, идиоморфизму и составу минералы группы ильменита.

Манганоильменит характеризуется узким диапазоном состава (таблица). Содержание железа FeO варьирует от 25.05 до 29.01 мас. %, марганца — от MnO 17.95 до 22.68 мас. %, количество титана TiO_2 — 52.24–53.07 мас. %. Из примесей в нем обнаружен лишь алюминий, количество которого не превышает 0.04 мас. %. Железомарганцевое отношение составляет более единицы (FeO/MnO — от 1.18 до 1.63). Доля пирофанитового минала составляет 38–45 %, также в некоторых пробах присутствует гематитовый минал, количество которого не превышает 2 %. Общая формула имеет следующий вид: $(Fe^{2+}_{0.53-0.60}Mn_{0.38-0.45}Fe^{3+}_{0-0.02})_{\Sigma 1.00-1.01}$

$Ti_{0.99-1.00}O_3$ (n = 32). Присутствие гематитового минала свидетельствует о более окислительных условиях при формировании манганоильменита по сравнению с пирофанитом.

Химический состав *пирофанита* следующий: TiO_2 — 52.78–53.09 мас. %, MnO — 24.35–27.18 мас. %, FeO — 20.02–22.73 мас. %, количество Al_2O_3 не превышает 0.02 мас. % (таблица 1) и соответствует железистому пирофаниту (рис. 4). Железомарганцевое отношение составляет менее единицы (FeO/MnO от 0.74 до 0.93). Доля пирофанитового минала выше, чем у манганоильменита, и составляет узкий диапазон от 52 до 58 %. Общая формула имеет следующий вид: $(Mn_{0.52-0.58}Fe^{2+}_{0.42-0.48})_{\Sigma 1.00}Ti_{1.00}O_3$ (n = 46).

Магнетит в своем составе постоянно содержит титан (TiO_2 5.87–7.30 мас. %) и марганец (до 0.20 %), количество общего железа FeO составляет 92.59–94.02 мас. %. Общая формула магнетита следующая: $Fe^{2+}_{1.16-1.20}(Fe^{3+}_{1.60-1.68}Ti_{0.16-0.20})_{\Sigma 1.80-1.84}O_4$ (n = 14).

Активность кислорода ($lgfO_2$), рассчитанная при помощи программ ILMAT 1.20 (Lepage, 2003) и MagMin_PT (Gündüz, Asan, 2023), для близких по времени образования минералов минеральной пары «магнетит — манганоильменит» составила узкий диапазон от –26 до –24, а для пары «магнетит — пирофанит» — от –36 до –32. Полученные данные указывают на низкую активность кислорода при кристаллизации данных минералов.

Восстановительный характер и обилие ильменита свойственно внутриплитным и коллизионным гра-

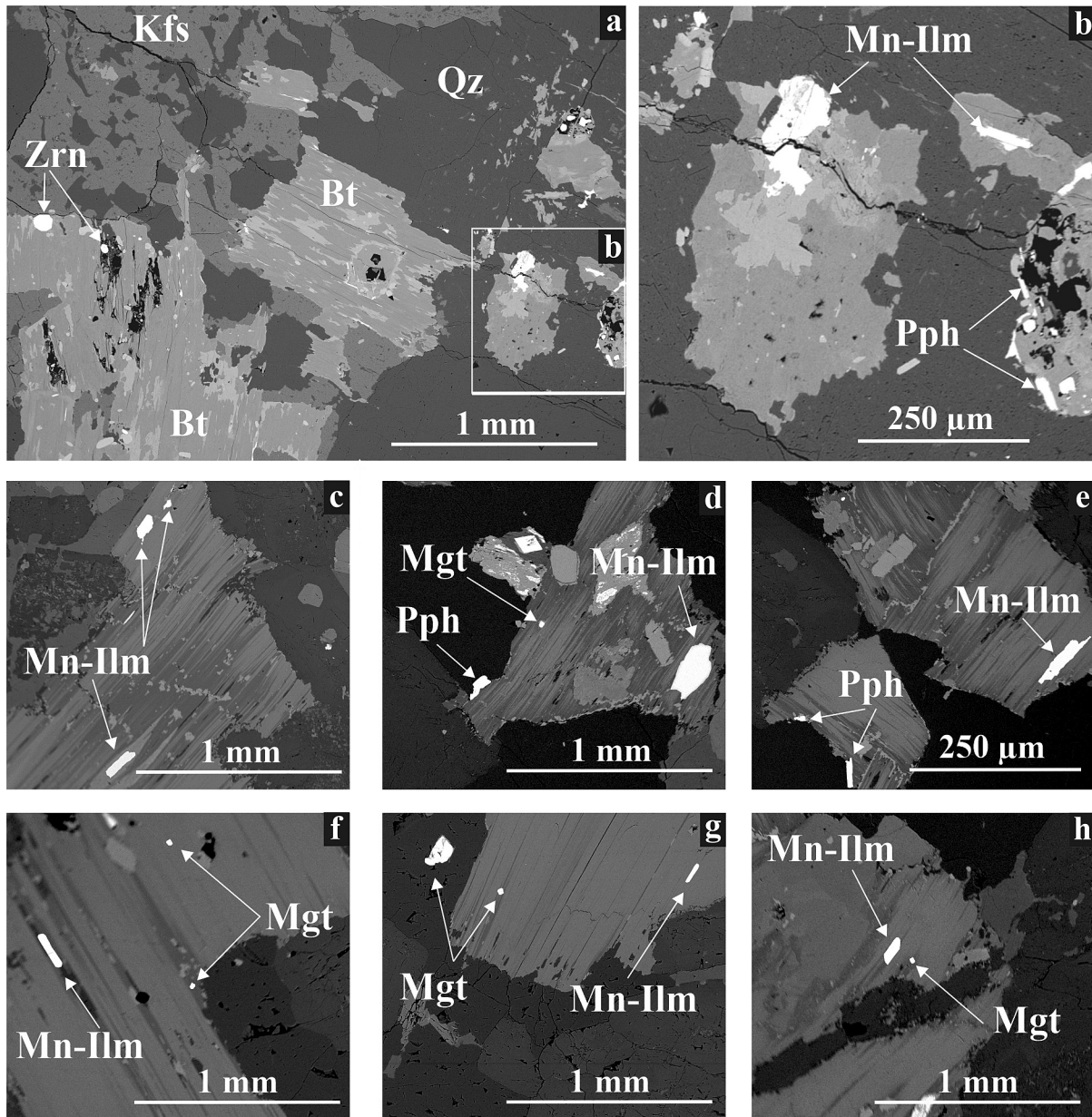


Рис. 3. BSE-изображения манганоильменита (Mn-Ilm), пирофанита (Pph) и магнетита (Mgt) в граните. Условные обозначения: Bt – биотит, Kfs – калиевый полево шпат, Qz – кварц, Zrn – циркон

Fig. 3. BSE image of manganoilmenite (Mn-Ilm), pyrophanite (Pph) and magnetite (Mgt) in granite. Legend: Bt – biotite, Kfs – potassium feldspar, Qz – quartz, Zrn – zircon

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и кристаллохимические коэффициенты пирофанита (1–7), манганоильменита (8–14) и магнетита (15–21)

Table 1. Chemical composition (wt.%) and crystallochemical coefficients of pyrophanite (1–7), manganoilmenite (8–14) and (15–21) magnetite

| Компоненты/Components | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TiO ₂ | 52.86 | 53.09 | 52.79 | 52.78 | 52.80 | 53.00 | 52.90 |
| Al ₂ O ₃ | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0 | 0 | 0.02 |
| FeO _{общ/tot} | 22.67 | 22.17 | 21.49 | 20.02 | 21.99 | 21.13 | 22.73 |
| MnO | 24.46 | 24.72 | 25.70 | 27.18 | 25.21 | 26.87 | 24.35 |
| Сумма/Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Коэффициенты в формуле / Coefficients in the formula, O = 3 (ATiO ₃) | | | | | | | |
| Ti | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Fe ^{3+*} | - | - | - | - | - | - | - |
| Fe ²⁺ | 0.48 | 0.47 | 0.45 | 0.42 | 0.46 | 0.43 | 0.44 |
| Mn | 0.52 | 0.53 | 0.55 | 0.58 | 0.54 | 0.57 | 0.56 |
| Сумма/Total | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |

| Компоненты/Components | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TiO ₂ | 52.24 | 53.03 | 52.25 | 52.67 | 52.80 | 52.64 | 53.07 |
| Al ₂ O ₃ | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.01 |
| FeO _{общ/tot} | 25.05 | 29.01 | 27.36 | 27.59 | 27.77 | 28.39 | 28.47 |
| MnO | 22.68 | 17.95 | 20.36 | 19.72 | 19.39 | 18.94 | 18.45 |
| Сумма/Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Коэффициенты в формуле / Coefficients in the formula, O = 3 (ATiO ₃) | | | | | | | |
| Ti | 0.99 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Fe ^{3+*} | 0.02 | - | 0.02 | - | - | 0.01 | - |
| Fe ²⁺ | 0.53 | 0.62 | 0.56 | 0.58 | 0.59 | 0.59 | 0.61 |
| Mn | 0.45 | 0.38 | 0.43 | 0.42 | 0.41 | 0.40 | 0.39 |
| Сумма/Total | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| Компоненты/Components | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| TiO ₂ | 6.16 | 7.25 | 7.30 | 6.85 | 5.98 | 5.89 | 5.87 |
| FeO _{общ/tot} | 93.69 | 92.63 | 92.59 | 93.02 | 93.86 | 93.98 | 94.02 |
| MnO | 0.15 | 0.12 | 0.11 | 0.13 | 0.16 | 0.13 | 0.11 |
| Сумма/Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Коэффициенты в формуле / Coefficients in the formula, O = 4 (AB ₂ O ₄) | | | | | | | |
| Ti | 0.17 | 0.20 | 0.20 | 0.19 | 0.16 | 0.16 | 0.16 |
| Fe ^{3+*} | 1.67 | 1.61 | 1.60 | 1.63 | 1.68 | 1.68 | 1.68 |
| Fe ²⁺ | 1.16 | 1.19 | 1.20 | 1.18 | 1.16 | 1.16 | 1.16 |
| Сумма/Total | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |

Кристаллохимические формулы / Crystal-chemical formulas:

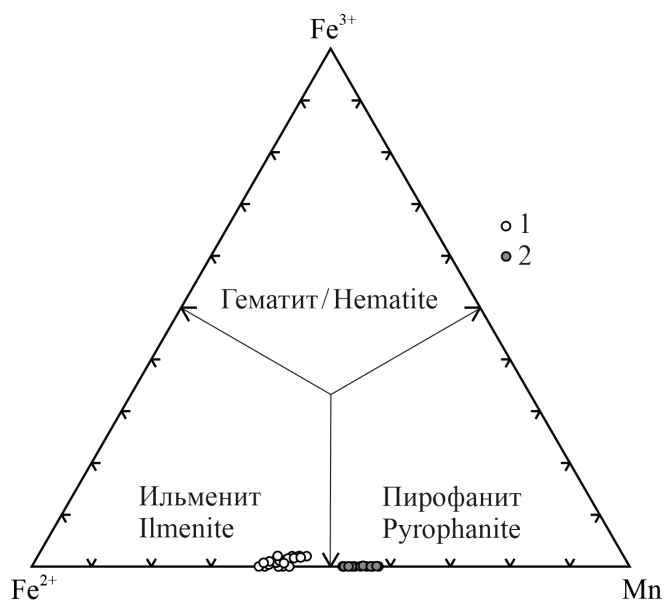
 1–7 – (Mn_{0.52–0.58}Fe²⁺_{0.42–0.48})_{Σ1.00}Ti_{1.00}O₃ пиррофанит / pyrophanite

 8–14 – (Fe²⁺_{0.53–0.60}Mn_{0.38–0.45}Fe³⁺_{0–0.02})_{Σ1.00–1.01}Ti_{0.99–1.00}O₃ – манганоильменит / manganoilmenite

 15–21 – Fe²⁺_{1.16–1.20}(Fe³⁺_{1.60–1.68}Ti_{0.16–0.20})_{Σ1.80–1.84}O₄ – магнетит / magnetite

Примечание: коэффициенты элементов, значение которых составляет менее 0.01, не приводятся

Note: coefficients of elements with value less than 0.01 are not given

 * – Fe³⁺ рассчитано по (Droop, 1987) / Fe³⁺ calculated according to (Droop, 1987).

Рис. 4. Состав минералов группы ильменита в координатах Fe²⁺–Mn–Fe³⁺ (мольные доли от (Fe²⁺+Mn+Fe³⁺)):

1 – манганоильменит, 2 – пиррофанит

Fig. 4. Composition of ilmenite group minerals in Fe²⁺–Mn–Fe³⁺ coordinates (molar fractions of (Fe²⁺+Mn+Fe³⁺)):

1 – manganoilmenite, 2 – pyrophanite

нитоидам S- и A-типов (Loiselle, Wones, 1979), к которым, по разным данным (Государственная..., 2007; Гусев, 1994), относятся гранитоиды турочакского комплекса.

Выводы

В гранитах третьей фазы внедрения турочакского комплекса совместно с магнетитом обнаружено одновременно наличие двух минералов группы ильменита – манганоильменита и железистого пиррофанита. Оба минерала являются беспримесными, отличаются расположением в породе, размерами зерен и железомарганцевым отношением. Магнетит характеризуется высокими содержаниями титана при низких количествах марганца. Показатель активности кислорода свидетельствует о восстановительных условиях при кристаллизации исследуемых минералов.

Литература / References

Багдасаров Э. А. Сравнительная характеристика состава ильменитов изверженных пород // Записки Всероссийского минералогического общества. 1986. № 2. С. 155–165.

Bagdasarov E. A. Comparative characteristics of the composition of ilmenites from igneous rocks. Proceedings of the All-Russian Mineralogical Society. 1986;2:155–165. Russian.



- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Алтае-Саянская. Лист N-45 — Новокузнецк. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. 665 с. State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1:1 000 000. The third generation. The Altai-Sayan series. Sheet N-45 — Novokuznetsk. Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI Publishing House; 2007. 665 p. Russian.
- Гусев А. И. Интрузивный магматизм Синюхинского золоторудного узла (северо-восточная часть Горного Алтая) // Геология и геофизика. 1994. № 11. С. 28—40. Gusev A. I. Intrusive magmatism of the Sinyukhinsky gold ore cluster (northeastern part of the Altai Mountains). Geology and Geophysics. 1994;11:28—40. Russian.
- Елбаев А. Л., Гордиенко И. В., Орсов Д. А., Ходырева Е. В. Пирофанит и манганоильменит в гранитоидах Хамнигадайского массива (Центральное Забайкалье) // Геосферные исследования. 2021. № 4. С. 50—61. DOI: 10.17223/25421379/21/4. Elbaev A. L., Gordienko I. V., Orsoev D. A., Khodyreva E. V. Pyrophanite and manganoilmenite in granitoids of the Khamnigadai massif (Central Transbaikalia). Geospheric studies. 2021;4:50—61. Russian.
- Калугин П. С., Брусницын А. И. Новые данные о минералогии марганцевых руд Парнокского месторождения, Полярный Урал // Металлогения древних и современных океанов. 2012. № 1. С. 86—90. Kalugin P. S., Brusnitsyn A. I. New data on the mineralogy of manganese ores of the Parnok deposit, Polar Urals. Metallogeny of ancient and modern oceans. 2012;1:86—90. Russian.
- Каминский Ф. В., Белоусова Е. А. Манганоильменит как минерал-спутник алмаза в кимберлитах // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1560—1570. Kaminsky F. V., Belousova E. A. Manganoilmenite as a diamond-associated mineral in kimberlites. Geology and Geophysics. 2009;50(12):1560—1570. Russian.
- Кориневский Е. В. PetroExplorer — система для создания геохимических информационно-аналитических массивов в процессе тематических исследований // Геоинформатика. 2015. № 4. С. 48—53. Korinevsky E. V. PetroExplorer — a system for creating geochemical information and analytical arrays in the process of thematic studies. Geoinformatics. 2015;4:48—53. Russian.
- Ляхович В. В. Аксессуары минералы горных пород. М.: Недра, 1979. 296 с. Lyakhovich V. V. Accessory minerals of rocks. Moscow: Nedra; 1979. 296 p. Russian.
- Минералы: Справочник. М.: Наука, 1967. Т. 2. Вып. 3. 676 с. Minerals. Handbook. Moscow: Nauka; 1967. 2(3):676 p. Russian.
- Наставко Е. В., Змеев Б. Ю., Федосюк Г. А. Температура кристаллизации гранитов Турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса на основе изучения химического состава минералов группы эпидота // Успехи современного естествознания. 2024. № 10. С. 88—95. DOI: 10.17513/use.38323. Nastavko E. V., Zmeev B. Yu., Fedosyuk G. A. Crystallization temperature of granites of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex based on the study of the chemical composition of epidote group minerals. Successes of modern natural science. 2024;10:88—95. Russian.
- Немов А. Б. Манганоильменит и пирофанит из сиенитов ильмено-вишневогорского щелочного комплекса (Южный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 5. С. 14—19. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-5-14-19. Nemov A. B. Manganoilmenite and pyrophanite from syenites of the Ilmeno-Vishnevogorsk alkaline complex (Southern Urals). Vestnik of the IG Komi SC UB RAS. 2017;5:14—19. Russian.
- Самигуллин А. А., Савельев Д. Е., Васильев А. М., Никонов В. Н. Петрохимические и минералогические особенности габбро-долеритов Суранского флюоритового месторождения (Южный Урал) // Геологический вестник. 2024. № 1. С. 76—90. DOI: 10.31084/2619-0087/2024-1-6. Samigullin A. A., Savelyev D. E., Vasiliev A. M., Nikonov V. N. Petrochemical and mineralogical features of gabbro-dolerites of the Suran fluorite deposit (Southern Urals). Geological Bulletin. 2024;1:76—90. Russian.
- Полякова Е. В. Ассоциация ильменита, пирофанита и псевдорутила в гранитоидах Северного массива (Чукотка) // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 258—262. Polyakova E. V. Association of ilmenite, pyrophanite and pseudorutile in granitoids of the Northern massif (Chukotka). Zapiski Gornogo Instituta. 2013;200:258—262. Russian.
- Попов В. А., Попова В. И., Блинов И. А. Минеральные ассоциации и состав аксессуарного магнетита вишневогорского щелочного комплекса на Южном Урале // Минералогия. 2017. Т. 3. № 4. С. 3—11. Popov V. A., Popova V. I., Blinov I. A. Mineral associations and composition of accessory magnetite of the Vishnevogorsk alkaline complex in the Southern Urals. Mineralogy. 2017;3(4):3—11. Russian.
- Путинцева Е. В., Спиридонов Э. М. Минералы группы ильменита древнейших в России алмазосных кимберлитов Кимозера, Карелия // Записки Российского минералогического общества. 2017. Т. 146. № 3. С. 69—86. Putintseva E. V., Spiridonov E. M. Minerals of the ilmenite group of the oldest diamond-bearing kimberlites in Russia of Kimozero, Karelia. Proceedings of the Russian Mineralogical Society. 2017;146(3):69—86. Russian.
- Савельев С. О. Минералогия марганцевых руд месторождения Жомарт, Атасуйский район, Центральный Казахстан // Металлогения древних и современных океанов. 2014. № 1. С. 87—91. Savelyev S. O. Mineralogy of manganese ores of the Zhomart deposit, Atasu district, Central Kazakhstan. Metallogeny of ancient and modern oceans. 2014;1:87—91. Russian.
- Смольянинова В. Н., Борисовский С. Е. Пирофанит в марганцевых рудах месторождения Прозрачное (Горный Алтай) // Известия АН СССР. Серия: Геология. 1984. № 9. С. 131—136. Smolyaninova V. N., Borisovsky S. E. Pyrophanite in manganese ores of the Prozrachnoye deposit (Altai Mountains). Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Series: Geology. 1984;9:131—136. Russian.
- Старикова Е. В., Завилейский Д. И. Геологическая позиция и вещественный состав фаменских марганцевых руд лемвинской зоны Пай-Хоя (на примере рудопоявлений Нижнесиловской группы) // Литология и полезные ископаемые. 2010. № 4. С. 383—400. Starikova E. V., Zavileyskiy D. I. Geological position and substance composition of Famensky manganese ores of the Lemvinskaya zone of Pай-Hoya (on the example of ore occurrences of the Nizhniesilovskaya group) // Lithology and useful minerals. 2010. № 4. С. 383—400.



- Starikova E. V., Zavileyskiy D. I. Geological position and material composition of Famennian manganese ores of the Lemvin zone of Pai-Khoi (using the example of ore occurrences of the Nizhnesilovskaya group). *Lithology and useful minerals*. 2010;4:383–400. Russian.
- Филиппов В. Н., Мальков Б. А. Барифлогодит и акцессорный пирофанит в алмазоносном кимберлите из трубки Ермаковской-7 на Кольском полуострове // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2005. № 8 (128). С. 5–10.
- Filippov V. N., Malkov B. A. Baryophlogopite and accessory pyrophanite in diamond-bearing kimberlite from the Ermakovskaya-7 pipe on the Kola Peninsula. *Vestnik of the Institute of Geology of the Komi SC UB RAS*. 2005;8(128):5–10. Russian.
- Ятимов У. А., Блинов И. А., Рассомахин М. А., Лебедева С. М., Сафаралиев Н. С. Минералы титана в рудах и скарнах магнетит-полиметаллического месторождения Актас, Западный Карамазар, Таджикистан // *Минералогия*. 2024. Т. 10. № 4. С. 172–185. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-9.
- Yatimov U. A., Blinov I. A., Rassomakhin M. A., Lebedeva S. M., Safaraliyev N. S. Titanium minerals in ores and skarns of the Aktash magnetite-polymetallic deposit, Western Karamazar, Tajikistan. *Mineralogy*. 2024;10(4):172–185. Russian.
- Anderson A. T. Oxidation of the LaBlache lake titaniferous magnetite deposit, Quebec. *Journal of Geology*. 1968;76:528–547.
- Buddington A. F., Lindsley D. H. Iron-Titanium Oxide Minerals and Synthetic Equivalents. *Journal of Petrology*. 1964;5:310–357.
- Droop G. T. R. A general equation for estimating Fe⁵⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*. 1987;51(361):431–435. DOI: 10.1180/minmag.1987.051.361.10
- Espeche M. J., Lira R. Pyrophanite in a scheelite skarn, Sierras Pampeanas, Cordoba, Argentina: a new paragenetic occurrence. *XII Congreso Argentino de Geología Económica*. 2020. P. 80–86.
- Gündüz M., Asan K. MagMin_PT: An Excel-based mineral classification and geothermobarometry program for magmatic rocks. *Mineralogical Magazine*. 2023;87(1):1–9. DOI: 10.1180/mgm.2022.113
- Lepage L. D. ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry. *Computers and Geosciences*. 2003;29:673–678. DOI: 10.1016/S0098-3004(03)00042-6
- Loiselle M. C., Wones D. R. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs*. 1979;11:468 p.
- Myšlan P., Števko M., Sejkora J., Ružička P., Mikuš T. Metamorphic manganese mineralisation bound to the metacarbonate lenses at the Smolník – Malá Hekerová deposit in the Spišskogemerské Rudohorie Mts., Western Carpathians (Slovakia). *Mineralogy and Petrology*. 2025;119:243–258. DOI: 10.1007/s00710-025-00922-4
- Pattnaik S., Majhi S. Mineralogy, geochemistry and genesis of low-grade manganese ores of Anujurhi area, Eastern Ghats, India. *Geologija*. 2024;67(2):285–300. DOI: 10.5474/geologija.2024.014
- Peters T., Feenstra A. Experimental determination of activities in FeTiO₃-MnTiO₃ ilmenite solid solution by redox reversals. *Contributions to mineralogy and petrology*. 1996;126:P.109–120.
- Rene M. Titanite-ilmenite assemblage in microgranodiorites from the northeastern margin of the Klenov granite body (Bohemian Massif, Czech Republic). *Acta Geodynamica and Geomaterialia*. 2011;8(4(164)):479–487.
- Sami M., Fathy D., Ntaflos T., Mahdy N. M. Composition and origin of Ti-Nb-Ta-Zr bearing minerals in the Abu Diab highly evolved granite from the Central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences*. 2020;165:103–808. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2020.103808
- Sasaki K., Nakashima K., Kanisawa S. Pyrophanite and high Mn ilmenite discovered in the Cretaceous Tono pluton, NE Japan. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Monatshefte*, 2003;7:302–320.
- Shubin I. I., Kogarko L. N. Geochemistry and Mineralogy of Manganese in the Lower Zone of the Lovozero Rare-Metal Deposit, Kola Peninsula. *Geochemistry International*. 2022;60(12):1262–1272. DOI: 10.1134/S0016702922120060
- Shroeder P. A., Le Golvan J. J., Roden M. F. Weathering of ilmenite from granite and chlorite schist in the Georgia Piedmont. *American Mineralogist*. 2002;87:1616–1625.
- Tarassova E., Tarassov M. First finds of pyrophanite and ferroan pyrophanite in Bulgaria as accessory minerals in the upper creta Granitovo-Chernozem pluton. *Proceeding of the Bulgarian Academy of Sciences*. 2012;65(1):67–74.
- Voudouris P., Xinou A., Kanellopoulos C., Kati M., Mavrogontas C., Lyberopoulos P. A new occurrence of pyrophanite from the amphibolite-hosted skarn in Western Kimmeria, Xanthi, Northern Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 2013;47(1):487–496. DOI: 10.12681/bgsg.11027
- Warr L. N. IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*. 2021;85:291–320.
- Xie L., Wang R. C., Wang D. Z., Qiu J. S. A survey of accessory mineral assemblages in peralkaline and more aluminous A-type granites of the southeast coastal area of China. *Mineralogical Magazine*. 2006;70(6):709–729. DOI: 10.1180/0026461067060362
- Zaccarini F., Garuti G., Ortiz-Suarez A., Carugno-Duran A. The paragenesis of pyrophanite from Sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina. *The Canadian Mineralogist*. 2004;42(1):155–168. DOI: 10.2113/gscanmin.42.1.155

Поступила в редакцию / Received 22.12.2025