

УДК 549.642.3

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-1

МИНЕРАЛОГИЯ АПАТИТ-ЭГИРИН-МЕЗОПЕРТИТОВЫХ ПЕГМАТИТОВ КОПИ № 243 ИЛЬМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАПОВЕДНИКА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**Е.П. Макагонов^{1,2}, С.А. Репина¹, М.А. Рассомахин¹**¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; mak@mineralogy.ru² Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, ул. 8 Июля 10, г. Миасс, Челябинская обл., 456301 Россия

Статья поступила в редакцию 14.03.2023 г., принята к печати 17.05.2023 г.

MINERALOGY OF APATITE-AEGIRINE-MESOPERTHITE PEGMATITES OF MINE NO. 243 OF THE ILMENY STATE RESERVE (SOUTH URALS)**E.P. Makagonov^{1,2}, S.A. Repina¹, M.A. Rassomakhin¹**¹ South-Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; mak@mineralogy.ru² South Urals State University, Miass Branch, ul. 8 Iyulya 10, Miass, Chelyabinsk district, 456301 Russia

Received 14.03.2023, accepted 17.05.2023

Аннотация. В статье рассмотрена минералогия апатит-эгирин-мезопертитовых пегматитов, которые находятся в фенитовом ореоле на юго-восточном контакте Селянкинского сиенитового массива на Южном Урале. Горными выработками вскрыты две пегматитовые жилы. Пегматиты отличаются от других известных жил Ильменского государственного заповедника высоким содержанием апатита и присутствием лучших коллекционных друз эгирина. В составе пегматитов установлены альбит, микроклин, эгирин, гидроксилapatит, фторапатит, кальцит, титанит, чевкинит-(Ce), магнетит, ильменит, гематит, рутил, гидроксиды Fe и Mn, монацит-(Ce), рабдофан-(Ce), рабдофан-(La), дальнегорскит.

Ключевые слова: эгирин, апатит, мезопертит, дальнегорскит, сиенит-пегматиты, фенит, Южный Урал.

Abstract. The paper describes mineralogy of apatite-aegirine-mesoperthite pegmatites, which are located in a fenite halo at the southeastern contact of the Selyankino syenite block (Ilmeny State Reserve, South Urals). Two pegmatite veins are exposed by mines. The pegmatites differ from the known veins of the Ilmeny State Reserve in a high amount of apatite and the presence of the best collection aegirine druses. The pegmatites contain albite, microcline, aegirine, hydroxyapatite, fluorapatite, calcite, titanite, chevkinite-(Ce), magnetite, ilmenite, hematite, rutile, Fe and Mn hydroxides, monazite-(Ce), rhabdophane-(Ce), rhabdophane-(La), and dalnegorskite.

Keywords: aegirine, apatite, mesoperthite, dalnegorskite, syenite pegmatites, phenite, South Urals.

Для цитирования: Макагонов Е.П., Репина С.А., Рассомахин М.А. Минералогия апатит-эгирин-мезопертитовых пегматитов копи № 243 Ильменского государственного заповедника (Южный Урал). Минералогия, 9(2), 5–19. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-1

For citation: Makagonov E.P., Repina S.A., Rassomakhin M.A. Mineralogy of apatite-aegirine-mesoperthite pegmatites of mine no. 243 of the Ilmeny State Reserve (South Urals). Mineralogy, 9(2), 5–19. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-1.

Введение

В литературе практически нет данных о сиенит-пегматитах южной (Ильменской) части Центральной щелочной полосы, расположенной между Ильменскими и Вишневыми горами на Южном Урале. Исключение составляют жилы уникального Селянкинского месторождения ильменорутита. В 1980–1981 гг. на восточном берегу р. Селянка в верхней части крутого склона Е.П. Макагоновым была заложена копь № 243. Горными выработками вскрыты два пегматитовых тела сиенит-пегматитов. Пегматиты копи № 243 отличаются от известных жил Ильменского заповедника высоким содержанием апатита и наличием лучших коллекционных друз эгирина. Судя по количеству и распределению образцов и глыб в осыпи крутого склона на восточном борту р. Селянка, пегматиты являются представителями серии параллельных жил юго-восточного края Селянкинского сиенитового массива.

Методы исследования

В процессе детальной геологической документации копи № 243 Е.П. Макагоновым производилась зарисовка жил по квадратам со сторонами 10 см и отбор образцов. Им же проведены измерения и составлены чертежи кристаллов. Собранный материал хранится в Естественно-научном музее Ильменского государственного заповедника. Фотографии образцов подготовлены С.А. Репиной. Исследованы образцы пород и минералов пегматитов, отобранных в друзовых полостях и в непосредственной близости от них. Кристаллы эгирина, полевых шпатов и апатита анализировались в продольных и поперечных сечениях. Ростовые взаимоотношения минералов изучены в агрегатах радиально-лучистого эгирина, образующих срастания с полевым шпатом и апатитом.

Электронно-микроскопические исследования проведены М.А. Рассомахиным с помощью СЭМ Tescan Vega 3 sbu с ЭДС приставкой Oxford Instruments X-act. Анализы выполнялись при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 15 нА и диаметре пучка электронов 1 мкм; время счета 120 с. Количественный анализ составов произведен с использованием эталонов сертифицированных стандартов № 1362 (Microanalysis Consultant Ltd), MINM25-53 (Astimes Scientific Limited, серийный номер 01-044) и НЭРМА. ГЕО1.25.10.7417. Расчет кристаллохимических формул выполнен Е.П. Макагоновым.

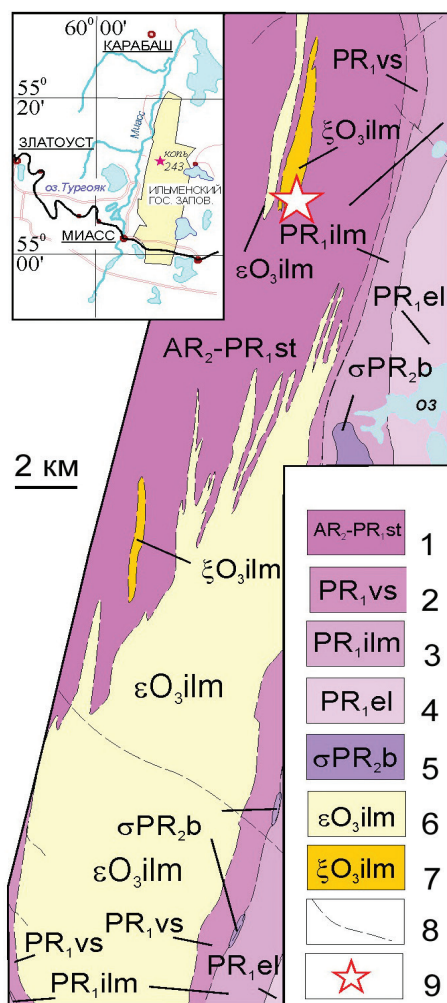
Геологическая характеристика пегматитовых жил

Копь № 243 находится в фенитовом ореоле на юго-восточном контакте Селянкинского сиенитового массива (рис. 1). Поперечной канавой и продольными расчистками обнажены две жилы сиенит-пегматитов (рис. 2). Жилы залегают в висячем юго-восточном боку Селянкинского массива вблизи его контакта с вмещающими гнейсами и амфиболитами селянкинской толщи. Данный массив входит в зону Центральной щелочной полосы, он прослеживается от северного окончания Ильменогорского миаскитового массива на север на 15 км при ширине полосы до 1.2 км (Левин и др., 1974). Геологическое описание Селянкинского массива приведено в работе А.Г. Баженова и др. (1976).

Вмещающие породы пегматитов представлены амфиболовыми, пироксеновыми и биотитовыми фенитами. Текстура пород полосчатая, местами линзовидная и гнейсовидная с переменным количеством темноцветных минералов. Участки фенитов содержат включения существенно пироксеновых пород: от мелкозернистых до крупнозернистых. Породы содержат многочисленные пустоты с друзами мелких кристаллов пироксена, полевого шпата, апатита, кальцита. Толщу фенитов пересекают относительно ровные маломощные (2–10 см) пегматитовые прожилки полевошпат-пироксенового состава. С восточной стороны пегматитов приконтактовые фениты сменяются амфиболитами и биотитовыми гнейсами, состав которых близок к гранитному, содержащими шпинель и силлиманит.

Восточная пегматитовая жила прослеживается вдоль склона на 50 м, из них 7 м вскрыто канавой (рис. 2). В северной части выработки жила выклинивается, но через тонкую прослойку фенитов с севера кулисообразно соединяется с южным окончанием идентичного пегматитового тела. Восточный контакт пегматитовой жилы простирается на северо-восток с углом 10° и погружается на восток под углом 66° . Мощность восточной жилы пегматитов около 1 м. Контакты жилы с боковыми породами резкие неровные извилистые.

Северная часть и зальбанды жилы сложены крупнозернистым агрегатом полевого шпата друзово-блоковой текстуры с интерстициями, выполненными кристаллами эгирина и апатита. Центральная часть жилы пересекается полевошпат-эгириновым меланократовым агрегатом с апатитом и кальцитом.



Жила рассекается системой трещин с азимутом простирания 350–340° и падением на северо-восток под углом 25–30°. Трещины выполнены кристаллами эгирина, полевого шпата, апатитом и кальцитом. Ширина полостей обычно 0.5–5.0 см, реже более. Первоначально друзовые полости были заполнены кальцитом, но в приповерхностных участках жилы кальцит большей частью выщелочен. Тонкие корки перетолченного кальцита наблюдаются на обломках пород в рыхлых отложениях.

Более поздние наложенные пустоты и трещинки в полевошпатовом агрегате выполнены регенерированным полевым шпатом, мелкими кристаллами кварца, лимонитизированными минералами. В пустотах находятся мелкие кристаллы титанита, ильменита и рутила. Некоторые трещины выполнены кварцем или асбестовидным ферривинчитом.

Западная пегматитовая жила вскрыта шурфом на глубине 1.5 м. Мощность жилы 50–70 см. Строение жилы блоковое: участки полевого шпата с индивидами до 25 см чередуются с участками,

сложенными блоками мономинерального желтовато-зеленого апатита и блоками эгирин-апатитового состава. В полевом шпате отмечаются ксеноморфные выделения ильменита длиной до 2–3 см. Количество апатита совместно с эгирин-апатитовыми агрегатами составляет до 30 % объема пегматитовой жилы.

Породообразующие минералы сиенит-пегматитов

Породообразующие минералы сиенит-пегматитов представлены (в порядке убывания) полевыми шпатами (альбитом и микроклином), эгирином, гидроксилapatитом и фторапатитом, кальцитом, ферривинчитом.

Полевые шпаты. В восточном жильном теле полевошпатовые участки пегматита сложены агрегатом блоково-друзовой текстуры. Отдельные плохо ограненные кристаллы срослись друг с другом, напоминая брекчию (рис. 3а). Размер отдельных ин-

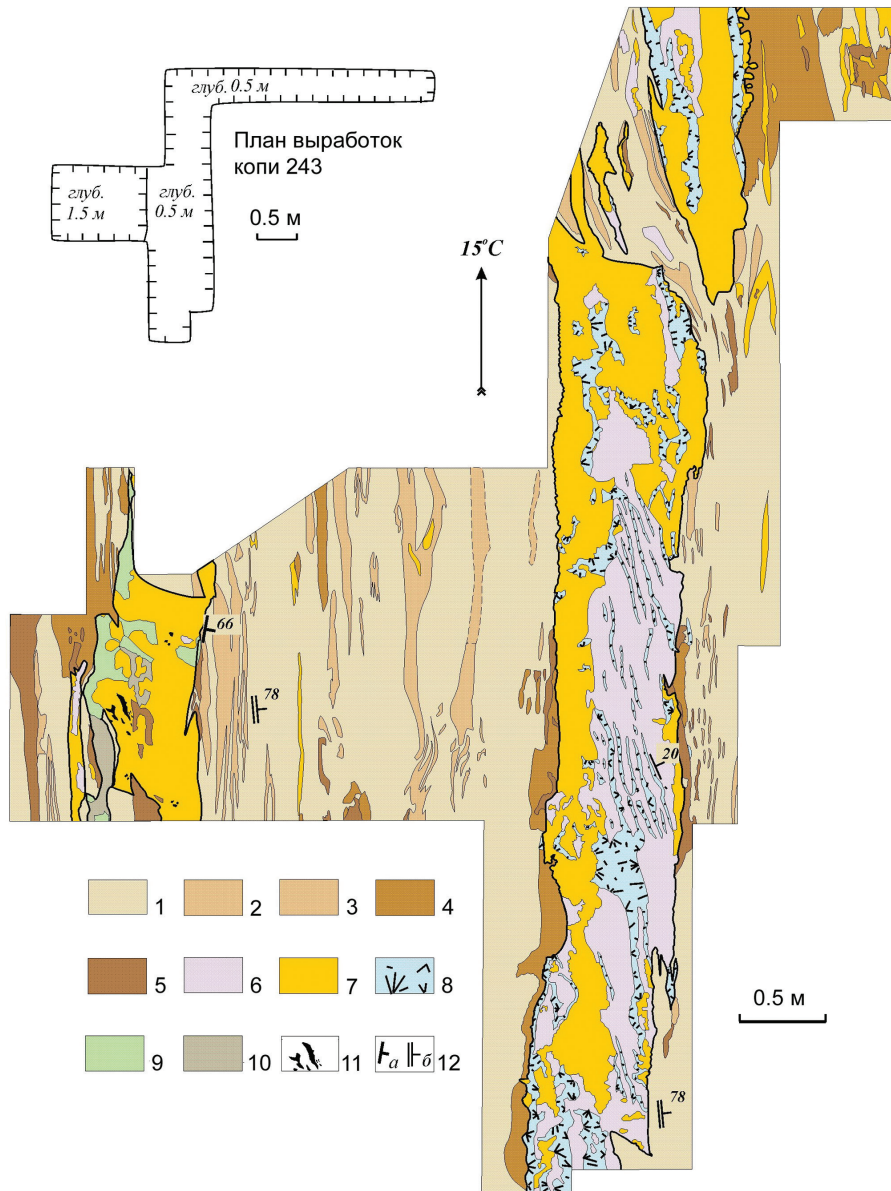


Рис. 2. Строение пегматитовых тел на геологическом плане копи № 243, составлено Е.П. Макагоновым.

1–3 – Фениты: 1 – лейкократовый; 2 – мезократовый; 3 – меланократовый; 4 – пироксеновая порода с полевым шпатом; 5 – мелко- до крупнозернистая мономинеральная пироксеновая порода; 6 – пироксеновый пегматоид; 7 – друзово-блоковый полевошпатовый пегматит; 8 – пироксеновые друзы с кальцитом; 9 – апатитовый агрегат; 10 – апатит-пироксеновый агрегат; 11 – ильменит; 12 – элементы залегания: а – минерализованных трещин, контактов; б – полосчатости.

Fig. 2. Structure of pegmatite bodies on geological plan of mine no. 243, composed by E.P. Makagonov.

Phenite: 1 – leucocratic; 2 – mesocratic; 3 – melanocratic; 4 – pyroxene rock with feldspar; 5 – fine- to coarse-grained monomineral pyroxene rock; 6 – pyroxene pegmatite; 7 – druse-blocky feldspar pegmatite; 8 – pyroxene druses with calcite; 9 – apatite aggregate; 10 – apatite-pyroxene aggregate; 11 – ilmenite; 12 – bedding elements of mineralized fractures and contacts (a) and banding (b).

дивидов полевого шпата 1–5 см, реже более; окраска серовато-желтая однородная или неотчетливо пятнистая. В ограничении кристаллов участвуют грани форм $\{110\}$, $\{010\}$, $\{001\}$, $\{201\}$, $\{101\}$, $\{021\}$, $\{02\bar{1}\}$, реже $\{120\}$, $\{1\bar{2}0\}$ (рис. 3б).

В западном жильном теле полевошпатовые обособления сложены крупными индивидами полевого шпата размером до 20 см. Местами у индивидов наблюдаются несовершенные грани форм $\{110\}$, $\{1\bar{1}0\}$, $\{001\}$, $\{120\}$, $\{1\bar{2}0\}$, $\{010\}$. Нередки

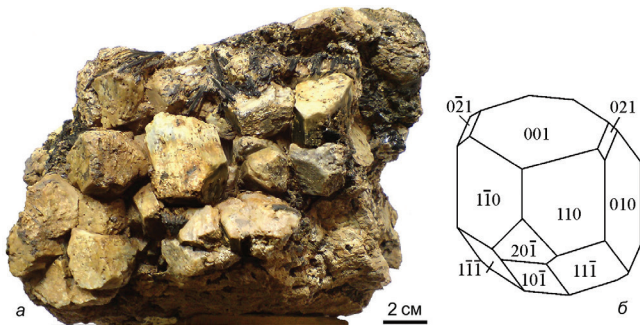


Рис. 3. Друзово-блоковый полевой шпат (а) и форма его кристаллов (б).

Fig. 3. Druse-blocky feldspar (a) and morphology of its crystals (б).

двойники по карлсбадскому закону. Цвет полевого шпата желтовато-кремовый, на плоскостях спайности по (001) – перламутровый. В индивидах полевого шпата отмечаются участки темно-серого цвета, просвечивающие до стекловидного с эффектами лунного и солнечного камня. В последнем случае эффект достигается за счет очень тонких включений пластинок гематита. Полевой шпат западного тела интенсивно деформирован. Наблюдаются изгибы плоскостей спайности, перегибы, залеченные трещины, полосы залеченных трещин, сколы с регенерационным рельефом.

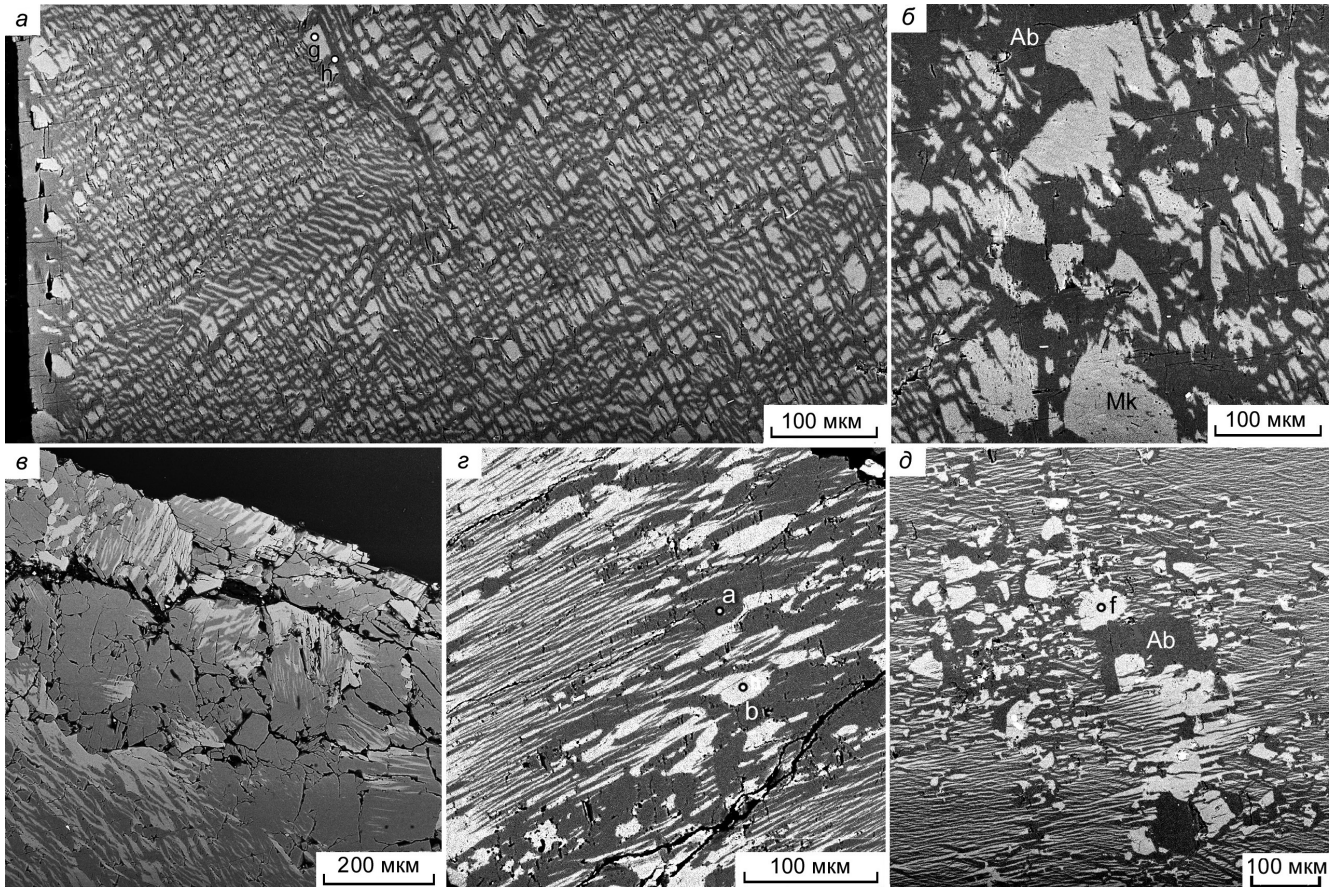


Рис. 4. Структура мезопертитового полевого шпата (серое – альбит, белое – микроклин): а-в – продольное сечение кристалла полевого шпата, параллельное (100): а – твидовая структура сростаний; б – фрагмент структуры в середине кристалла; в – мелкозернистый агрегат мезопертита на грани крупного кристалла; г – укрупнение пертитов калиевого полевого шпата у границы индивидов; д – зернистый агрегат полевых шпатов в каверне монокристалла мезопертита. Al – альбит, Mk – микроклин.

Здесь и на рис. 6, 7 и 10 – BSE фото.

Fig. 4. Structure of mesoperthite feldspar (gray – albite, white – microcline): а-в – longitudinal section of feldspar crystal parallel to (100): а – tweed structure of intergrowths; б – fragment of structure in the center of the crystal; в – fine-grained mesoperthite aggregate at the edge of a large crystal; г – enlarged K-feldspar perthite at the boundary of individuals; д – granular feldspar aggregate in the cavity of mesoperthite monocrystal. Al – albite, Mk – microcline.

Here and in Figs. 6, 7 and 10 – BSE image.

Структуры сростаний полевых шпатов хорошо проявляются на электронных изображениях (рис. 4). По соотношению между альбитовой и микроклиновой фазами, в основном близкому к паритетному, полевой шпат относится к мезоперти-ту. Участками альбитовая составляющая преобла-дает, поэтому такой полевой шпат можно отнести к антипертитам. В сечениях антипертиты имеют самую разнообразную форму: линзовидную, шну-ровидную, изометричную, пятнистую и сложную, обусловленную сочетанием этих форм. Индивиды калиевого полевого шпата в агрегатах имеют тон-кие альбитовые каемки.

Альбитовые фазы мезопертитов практиче-ски чистые, соответствуют кристаллохимической формуле. Примеси Ca, Fe, Mg составляют менее 0.1 к.а.ф. (табл. 1, ан. k–a). В химическом составе микроклина содержится до 14 % альбитового ми-нала. Среди примесей отмечаются следы Ba, Fe, Ti (табл. 1, ан. c–b’).

Детально изучено сечение кристалла мезо-пертита, параллельное (100). Длина кристалла около 2.5 см, он несколько вытянут относительно изображенного на рисунке 3б. На BSE-снимках представлено три изображения с разных участков кристалла: – присыпки микрозерен мезопертита на верхнем крае кристалла (рис. 4в); фрагменты из поперечного профиля кристалла, начиная от гра-ни $\{0\bar{1}1\}$, слева (рис. 4г) и в центральной части (рис. 4д).

Основная матрица кристалла представле-на мезопертитом твидовой структуры (рис 4а). Кристалл трещиноват и содержит каверны. По кра-ям кристалла, трещинам и в кавернах индивиды микроклина увеличиваются в размерах и местами структура переходит в микрозернистую (рис. 4г, д). В каемках кристаллов и в центрах каверн находятся почти мономинеральные выделения альбита. При остановке кристаллизации микроклина альбит про-должал расти, постепенно перекрывая простран-ство над индивидами микроклина. После смыкания краев альбита над микроклином остались пустоты (рис. 4а). Местами эти пустоты заполнены апати-том.

Эгирин $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$ – второй по распространен-ности минерал – образует радиально-лучистые и призматические кристаллы. Радиально-лучистый эгирин в основном находится в породе в тесном сростании с полевым шпатом (рис. 5). Промежутки между кристаллами пироксена выполняет мезопер-тит, иногда апатит. Призматические кристаллы эги-рина образуют друзовые агрегаты на стенках поло-стей, сложенных мезопертитовым полевым шпатом (рис. 5). На кристаллах пироксена отмечаются гра-ни форм $\{110\}$, $\{010\}$, $\{001\}$, $\{101\}$, $\{332\}$ (рис. 5). Кристаллы эгирина обоих типов интенсивно тре-щиноваты. По трещинам в эгирине располагаются многочисленные включения гематита, магнетита, ильменита, альбита, апатита, сфена, рутила, мона-цита, ферривинчита (рис. 6).

Таблица 1

Химический состав альбита (k–a) и микроклина (c–b’), мас. %

Table 1

Chemical composition of albite (k–a) and microcline (c–b’), wt. %

Точки анализа	d	b	h	a	c	f	g	b	b’
SiO ₂	67.34	67.50	68.01	67.78	65.17	64.89	65.49	65.45	65.39
Al ₂ O ₃	20.52	20.80	19.62	20.42	18.43	18.57	18.82	18.55	18.70
CaO	–	0.54	0.17	0.18	–	–	–	–	–
Na ₂ O	11.05	10.73	11.79	11.46	1.68	1.15	1.54	1.24	1.35
K ₂ O	0.31	0.13	–	0.13	14.05	14.47	13.96	14.55	13.97
FeO	0.45	–	0.25	–	–	–	–	–	0.27
Сумма	99.88	99.70	99.84	99.97	99.74	99.08	99.81	99.79	99.85
Формулы рассчитаны на пять катионов									
d	$(\text{Na}_{0.94}\text{K}_{0.02}\text{Mg}_{0.01}\text{Fe}_{0.02})_{0.99}(\text{Si}_{2.95}\text{Al}_{1.06})_{4.01}\text{O}_8$				f				
b	$(\text{Na}_{0.92}\text{K}_{0.01}\text{Ca}_{0.03})_{0.95}(\text{Si}_{2.97}\text{Al}_{1.08})_{4.05}\text{O}_8$				g				
h	$(\text{Na}_{1.00}\text{Ca}_{0.01}\text{Fe}_{0.01})_{1.02}(\text{Si}_{2.97}\text{Al}_{1.01})_{3.98}\text{O}_8$				b				
a	$(\text{Na}_{0.97}\text{K}_{0.01}\text{Ca}_{0.01})_{0.99}(\text{Si}_{2.96}\text{Al}_{1.05})_{4.01}\text{O}_8$				b’				
c	$(\text{K}_{0.83}\text{Na}_{0.15})_{0.99}(\text{Si}_{3.01}\text{Al}_{1.00})_{4.01}\text{O}_8$				$(\text{K}_{0.86}\text{Na}_{0.10})_{0.96}(\text{Si}_{3.02}\text{Al}_{1.02})_{4.04}\text{O}_8$				
					$(\text{K}_{0.82}\text{Na}_{0.14})_{0.96}(\text{Si}_{3.02}\text{Al}_{1.02})_{4.04}\text{O}_8$				
					$(\text{K}_{0.86}\text{Na}_{0.11})_{0.97}(\text{Si}_{3.02}\text{Al}_{1.01})_{4.03}\text{O}_8$				
					$(\text{K}_{0.82}\text{Na}_{0.12})_{0.96}(\text{Si}_{3.02}\text{Al}_{1.02})_{4.04}\text{O}_8$				

Примечание. Анализы дополнительно содержат (мас. %): k – 0.21 MgO; c – 0.41 BaO; b’ – 0.17 TiO₂. Положение точек анализов см. на рис. 4.

Note. The analyses also contain (wt. %): k – 0.21 MgO; c – 0.41 BaO; b’ – 0.17 TiO₂. For the position of analytical points, see Fig. 4.

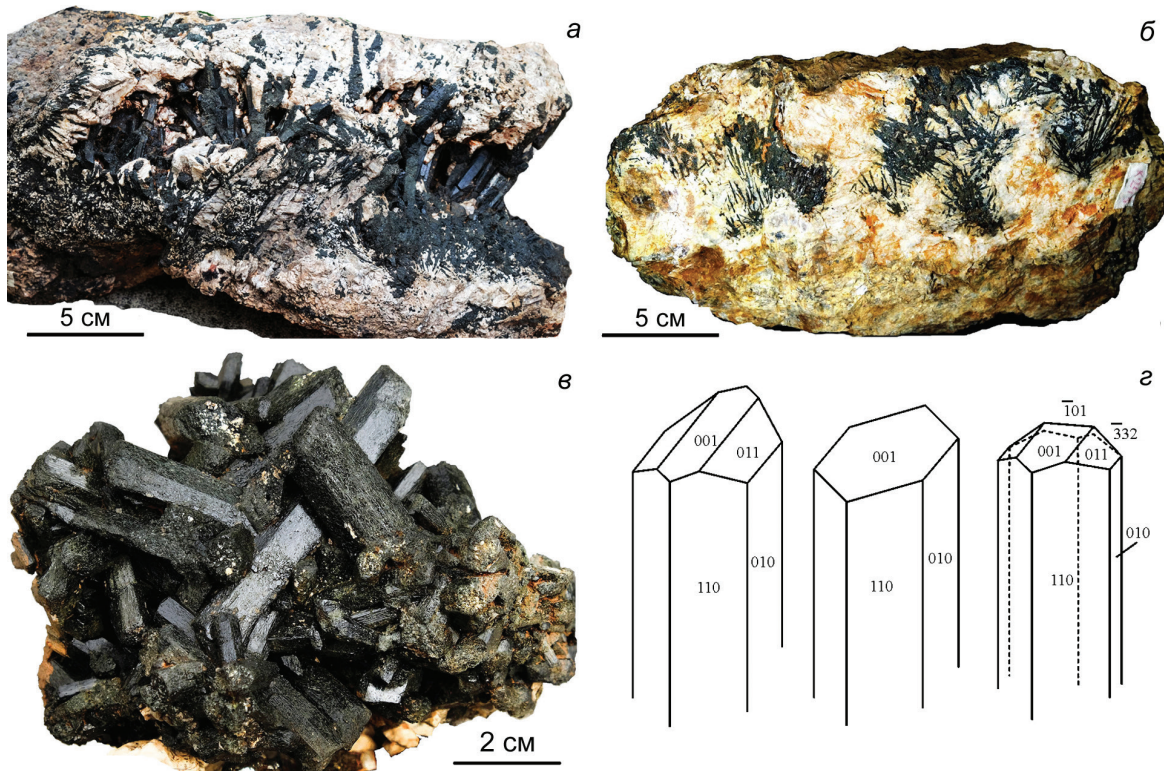


Рис. 5. Кристаллы эгирина в пегматитах копи № 243: а – кристаллы в друзовой щели; б – радиально-лучистые агрегаты в полевом шпате; в – друза эгирина; г – формы кристаллов эгирина.

Fig. 5. Aegirine crystals in pegmatite of mine no. 243: а – crystals in a druse gap; б – radial aggregates in feldspar; в – aegirine druse; г – morphology of aegirine crystals.

Рис. 6. Типы кристаллов эгирина в продольном срезе: радиально-лучистый (слева) и призматический (справа) с многочисленными включениями альбита, апатита, гематита, ильменита, рутила, титанита, монацита, чевкинита и ферривинчита по трещинам.

Здесь и на рис. 7 и 10, белые точки – участки СЭМ-ЭДС анализов.

Fig. 6. Types of aegirine crystals in longitudinal section: radial (left) and prismatic (right) with numerous inclusions of albite, apatite, hematite, ilmenite, rutile, titanite, monazite, chevkinite, and ferrivinchite along fractures.

Here and in Fig. 7 and 10, the white points – areas of SEM-EDS analyses.



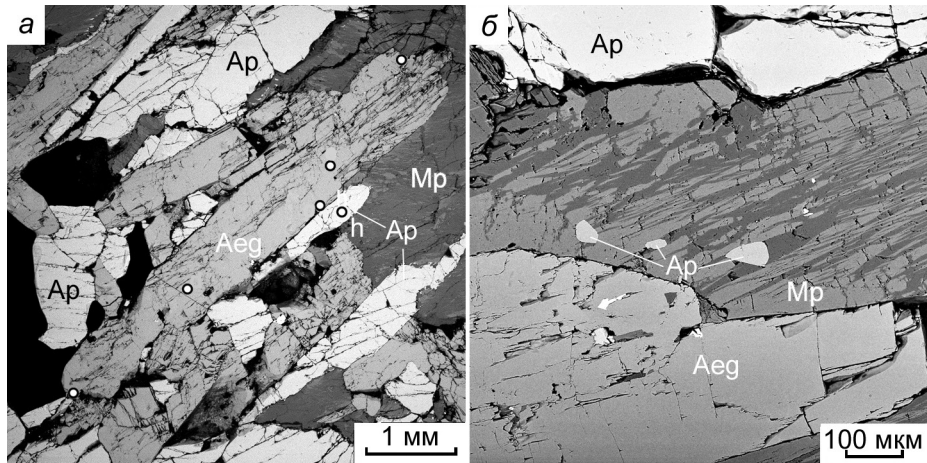


Рис. 7. Взаимоотношение породообразующих минералов в апатит-пироксен-полевошпатом агрегате: а – сростания апатита (Ар) и эгирина (Аег); б – включения апатита в мезопертит (Мр).

Fig. 7. Relationship of rock-forming minerals in apatite-pyroxene-feldspar aggregate: a – intergrowths of apatite (Ap) and aegirine (Aeg); б – apatite inclusions in mesoperthite (Mp).

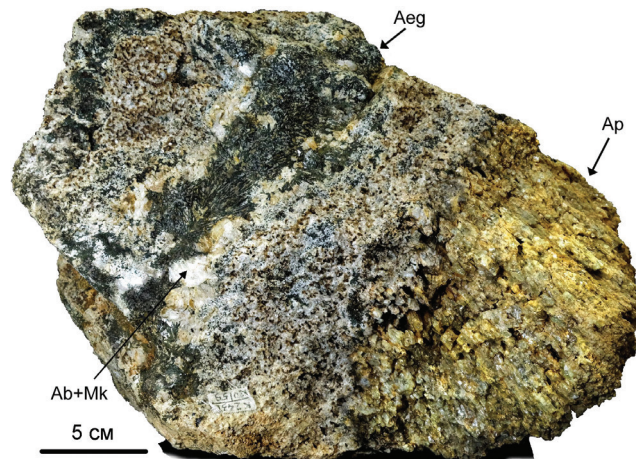


Рис. 8. Зональный пегматит из западного пегматитового тела копи № 243.

Ab + Mk – альбит с микроклином.

Fig. 8. Zoned pegmatite from a western pegmatite body of mine no. 243.

Ab + Mk – albite with microcline.

Несмотря на различную морфологию и разное время отложения, состав разных участков кристаллов пироксена практически идентичен. Средний химический состав из 15 анализов пироксена (мас. %, в скобках – стандартное отклонение): SiO₂ 52.91 (0.39), TiO₂ 0.72 (0.27), Al₂O₃ 2.52 (0.36), FeO 17.46 (0.70), MnO 0.56 (0.07), MgO 6.21 (0.39), CaO 12.52 (0.60), Na₂O 6.84 (0.44), сумма 99.73 (0.19). При расчете на четыре катиона средняя кристаллохимическая формула пироксена имеет вид (Na_{0.49}Ca_{0.50}Fe²⁺_{0.01})_{1.00}(Fe³⁺_{0.50}Mg_{0.34}Al_{0.08}Fe²⁺_{0.04}Mn_{0.02}Ti_{0.02})_{1.00}(Si_{1.97}Al_{0.03})_{2.00}O₆. Стандартное отклонение содержания отдельных химических элементов находится в пределах 0.00–0.02 к.а.ф. 98 % минерального состава распределяются по следующим видам (в формульных коэффициентах): эгирин 0.48 (0.51–0.45), ди-

опсид 0.34 (0.38–0.31), кушироит 0.07 (0.10–0.03), геденбергит 0.02 (0.07–0.00), гроссманит 0.02 (0.05–0.01), жадеит 0.01 (0.04–0.00), йохансенит и ферросилит по 0.02 (0.03–0.01).

Ферривинчит CaNaMg₄FeSi₈O₂₂(OH)₂ отмечается по трещинам и в пустотках между индивидами основных породообразующих силикатов. Агрегаты игольчатые до асбестовидных. Цвет голубовато-серый. Химический состав ферривинчита (мас. %): SiO₂ 53.21, TiO₂ 0.41, Al₂O₃ 2.47, FeO 17.91, MnO 0.61, MgO 12.73, CaO 5.91, Na₂O 4.74, K₂O 0.24, сумма 98.23. Химический состав минерала соответствует кристаллохимической формуле (Na_{0.22}K_{0.04})_{0.26}(Na_{1.09}Ca_{0.91})_{2.00}(Mg_{2.00}Fe³⁺_{1.11}Fe²⁺_{1.04}Mn_{0.07}Ti_{0.04}Al_{0.03})_{5.00}(Si_{7.61}Al_{0.39})_{8.00}O₂₂(OH)₂.

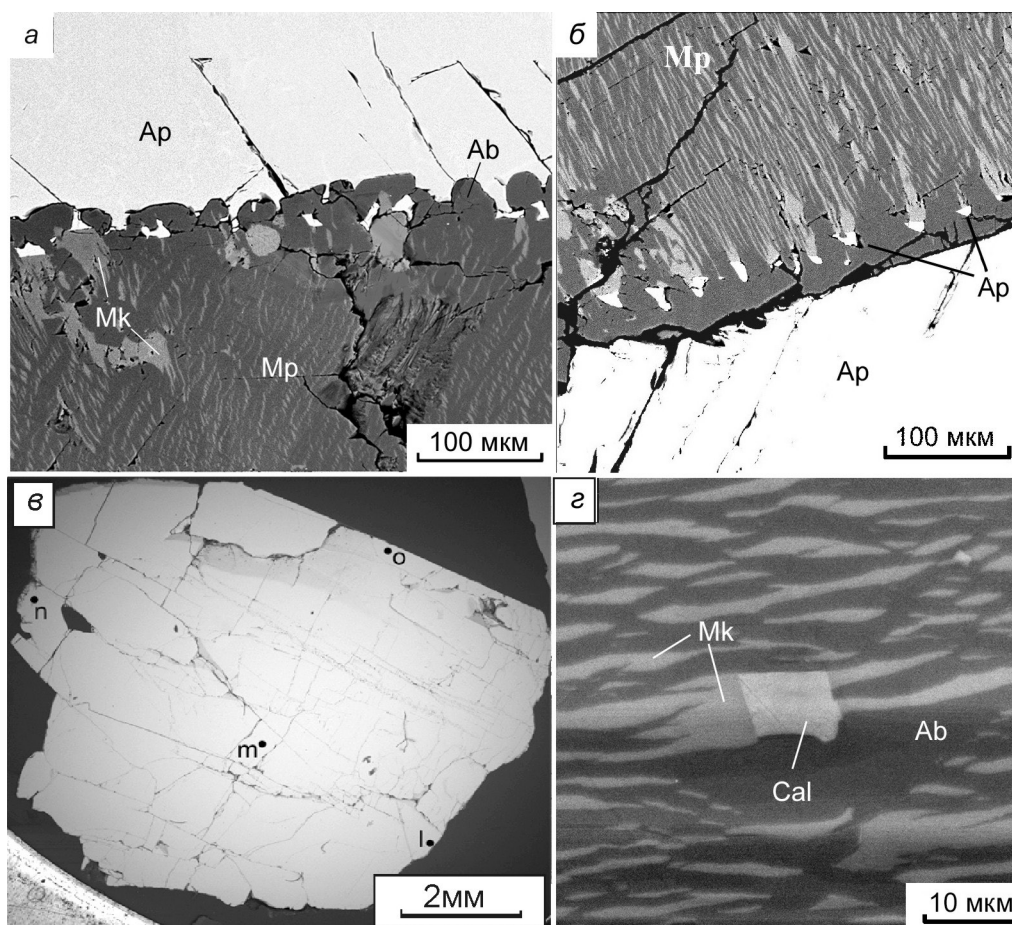


Рис. 9. Взаимоотношение апатита, мезопертита и кальцита в апатит-пироксен-полевошпатовом агрегате копи № 243: а – нарастание апатита на мезопертит (темно-серое – альбит, светло-серое – микроклин); б, в – апатит на индивидуальных микроклинах на границе альбита с мезопертитом; г – взаимоотношение зародыша кальцита (Cal) с мезопертитом.

Ab – альбит, Ap – апатит, Mk – микроклин, Mp – мезопертит.

Fig. 9. Relationship of apatite, mesoperthite and calcite in apatite-pyroxene-feldspar aggregate of mine no. 243: а – overgrowth of apatite on mesoperthite (dark gray – albite, light gray – microcline); б, в – apatite on microcline at the albite-mesoperthite boundary; г – relationship of calcite (Cal) with mesoperthite.

Ab – albite, Ap – apatite, Mk – microcline, Mp – mesoperthite.

Гидроксилапатит CaPO_4OH и *фторапатит* CaPO_4F отмечаются в восточном пегматитовом теле в виде включений в полевых шпатах и пироксене, а также в виде одиночных кристаллов в друзах совместно с силикатами (рис. 7). Кристаллы апатита длинно-призматические с гексагональной призмой и пирамидальной головкой с закругленными гранями. Содержание апатита в породах варьирует от 0.5 до 15.0 об. %. В западном пегматитовом теле апатит обособлен в блоках размером до 20 см. Апатит в блоках гранулирован, тем не менее, устанавливается первичная параллельно-шестоватая структура с индивидами размером 0.5–2.2 см в поперечнике (рис. 8). Помимо крупных обособлений апатит образует включения во внешних зонах индивидов полевого шпата (рис. 9а, б, в), заполняя остаточные

полости. Химический состав апатита соответствует границе минеральных видов гидроксилапатита и фторапатита (табл. 2). Зональность состава в продольном сечении кристалла апатита размером до 1.5 см по удлинению не обнаружена. Результаты пяти анализов близки, как в середине кристалла, так и по его краям (табл. 2). Для всех анализов характерна постоянная примесь Sr 0.06–0.07 к.а.ф. и незначительная примесь Na.

Кальцит CaCO_3 образует крупнозернистые агрегаты, выполняющие центральные части друзовых полостей и остаточные пустоты. Изредка отмечаются индукционные поверхности с силикатами, особенно хорошо проявленные на гранях эгирина. Зародыши кальцита встречаются в мезопертитах, где они нарушают структуру микроклиновых

Таблица 2

Химический состав гидроксилapatита (m, o) и фторапатита (l, n, h), мас. %

Table 2

Chemical composition of hydroxylapatite (m, o) and fluorapatite (l, n, h), wt. %

Точки анализа	m	o	l	n	h
CaO	54.97	53.51	52.27	54.02	52.59
SrO	1.18	1.36	1.42	1.15	1.44
Na ₂ O	0.23	0.27	0.28	0.26	–
SiO ₂	–	0.29	0.69	–	0.49
Ce ₂ O ₃	0.28	0.19	–	0.28	0.19
P ₂ O ₅	41.13	40.05	40.51	40.59	39.88
F	1.79	1.77	2.46	1.85	2.13
Cl	–	0.05	0.04	–	–
H ₂ O	0.93	0.89	0.55	0.88	0.70
Сумма	100.51	98.75	98.22	99.03	97.42

Формулы рассчитаны на восемь катионов

m – (Ca_{4.96}Sr_{0.06}Na_{0.04}Ce_{0.01})_{5.07}P_{2.93}O₁₂(OH)_{0.52}F_{0.48};
o – (Ca_{4.92}Sr_{0.07}Na_{0.04}Ce_{0.01})_{5.04}(P_{2.91}Si_{0.02}S_{0.02})_{2.96}O₁₂(OH)_{0.51}F_{0.48}Cl_{0.01};
l – (Ca_{4.85}Sr_{0.07}Na_{0.05})_{4.97}(P_{2.97}Si_{0.06})_{3.03}O₁₂F_{0.67}(OH)_{0.32}Cl_{0.01};
n – (Ca_{4.95}Sr_{0.06}Na_{0.04}Ce_{0.01})_{5.06}P_{2.94}O₁₂F_{0.50}(OH)_{0.50};
h – (Ca_{4.93}Sr_{0.07}Ce_{0.01})_{5.01}(P_{2.95}Si_{0.04})_{2.99}O₁₂F_{0.59}(OH)_{0.41}.

Примечание. Анализ m дополнительно содержит 0.37 мас. % SO₃. Положение точек анализов см. на рис. 9в.

Note. Analysis m also contains 0.37 wt. % SO₃. For the position of analytical points, see Fig. 9в.

востков (рис. 9г). В верхней части пегматитовых жил кальцит в основном выщелочен, но тонкие корки кальцита сохраняются на отдельных глыбах и стенках трещин в горных породах. Химический состав кальцита (мас. %): FeO 3.17, MnO 1.00, MgO 0.68, CaO 51.31, сумма 56.16. CO₂, рассчитанное по стехиометрии – 43.57. Кристаллохимическая формула кальцита (Ca_{0.92}Fe_{0.05}Mg_{0.02}Mn_{0.01})_{1.00}CO₃.

Акцессорные минералы сиенит-пегматитов

Акцессорные минералы сиенит-пегматитов представлены титанитом, чевкинитом-(Ce), магнетитом, ильменитом, гематитом, рутилом, гидроксидами Fe и Mn, монацитом-(Ce), рабдофаном-(Ce), рабдофан-(La) и дальнегорскитом.

Титанит CaTiSiO₄ образует мелкие включения в породообразующих силикатах: эгирине вместе с альбитом или мезопертитом (рис. 10а, б). Химический состав титанита из включений в разных минералах практически идентичен (мас. %): в эгирине – SiO₂ 31.27, TiO₂ 39.6, Al₂O₃ 0.43, FeO 1.35, CaO 27.25, сумма 99.90, Ca_{0.95}Ti_{0.97}Al_{0.02}Fe_{0.04}Si_{1.02}O₄ (расчет на три катиона), мезопертите – SiO₂ 30.84, TiO₂ 38.04, Al₂O₃ 1.50, FeO 0.68, CaO 28.74, сумма 99.80, Ca_{1.00}(Ti_{0.93}Al_{0.06}Fe_{0.02})_{1.01}Si_{1.00}O₄.

Чевкинит-(Ce) (Ce,La)₄(Fe,Ti)₃(TiO₄)₂Si₂O₇ обнаружен в виде ксеноморфных включений размером 5–20 мкм в эгирине (рис. 10в, г). Химический состав неизменного чевкинита характеризует точка анализа г на рисунке 10 и в таблице 3. Нередко чевкинит в различной степени изменен, что наблюдается в трещине этого же зерна (анализ s). Здесь чевкинит значительно гидратирован, что проявляется в увеличении содержания молекулярной воды до 0.75 ф.к. В слабо гидратированных зернах чевкинита (точка t) на долю молекулярной воды приходится 0.13 к.а.ф.

Магнетит FeFe₂O₄ наблюдается в виде тонкой редкой вкрапленности во вмещающих породах и в минералах пегматитов, нередко в сростании магнетита с ильменитом (рис. 11а). Химический состав магнетита содержит примеси Cr, V (мас. %): FeO 92.05, Cr₂O₃ 0.30, V₂O₅ 0.38, TiO₂ 0.15, SiO₂ 0.32, сумма 93.20. Формула магнетита, рассчитанная на 3 катиона, имеет вид: Fe_{1.04}(Fe_{1.93}Cr_{0.01}V_{0.01}Si_{0.01})_{1.96}O_{4.00}.

Ильменит FeTiO₃ образует таблитчатые кристаллы размером до 150 мкм (рис. 11а, б). Химический состав двух зерен ильменита (мас. %): 1 – TiO₂ 48.75, FeO 47.19, MnO 3.62, Ta₂O₅ 0.29, сумма 99.85; 2 – TiO₂ 47.43, FeO 48.48, MnO 4.25, MgO 0.37, сумма 100.53. Кристаллохимические формулы, рассчитанные на два катиона: 1 –

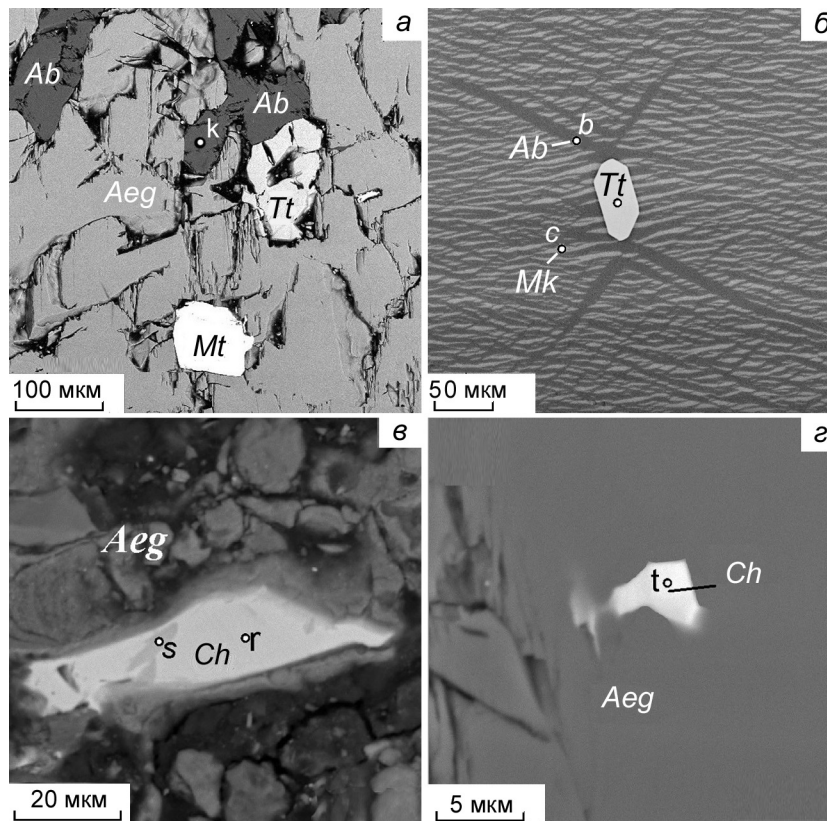


Рис. 10. Включения титанита и чевкинита в минералах пегматита копи № 243: а – титанит (Tt) и магнетит (Mt) в эгирине и альбите; б – мезопертит с кристаллом титанита, у вершин которого наблюдаются трещины напряжения, залеченные альбитом; в, г – включения чевкинита (Ch) в эгирине.

Fig. 10. Inclusions of titanite and chevkinite in pegmatite of mine no. 243: а – titanite (Tt) and magnetite (Mt) in aegirine and albite; б – mesoperthite with a titanite crystal exhibiting stress fractures healed by albite at the top; в, г – inclusions of chevkinite (Ch) in aegirine.

Химический состав чевкинита-(Ce), мас. %

Таблица 3

Chemical composition of chevkinite-(Ce), wt. %

Table 3

Точки анализов	Компоненты															Сумма	
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SrO	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃		ThO ₂
г	–	0.98	20.79	–	3.88	18.61	0.57	10.66	1.17	1.17	–	18.63	19.65	0.56	2.87	–	99.54
s	0.35	1.79	16.55	2.03	2.75	19.29	0.24	11.10	0.93	0.89	0.41	14.74	17.20	–	–	0.42	88.69
t	–	1.92	21.27	–	4.33	17.60	–	9.57	–	3.18	–	13.48	20.60	1.65	4.80	–	98.40

Формулы рассчитаны на 13 катионов

г – (Ce_{1.42}La_{1.35}Ca_{0.82}Nd_{0.20}Pr_{0.04}Sr_{0.13})_{3.96}(Fe²⁺_{1.75}Zr_{0.11}Mn_{0.10})_{1.96}Ti_{2.76}Al_{0.23}Si_{0.09})_{3.07}[Si_{2.00}O₇]_{2.00}

s – (Ce_{1.39}La_{1.20}Ca_{0.65}Sr_{0.12}Mg_{0.11})_{3.46}(Fe²⁺_{2.04}Zr_{0.10}Mn_{0.04})_{2.14}(Ti_{3.19}Al_{0.10}Nb_{0.04})_{3.26}[Al_{0.18}Si_{1.82}O₇]_{2.00} × 0.75(H₂O)

t – (Ce_{1.49}La_{0.98}Ca_{0.92}Nd_{0.34}Pr_{0.12})_{3.86}(Fe²⁺_{1.58}Zr_{0.31})_{1.89}(Ti_{2.62}Al_{0.45}Si_{0.20})_{3.26}[Si₂O₇]_{2.00} × 0.13(H₂O)

Примечание. Положение точек анализов см. на рис. 10в, г. Содержание H₂O рассчитано из суммы анализа примерно 100 %.

Note. For the position of analytical points, see Figs. 10в and 10г. The H₂O content is calculated from the analytical total of ~100 %.

Fe_{1.00}(Ti_{0.92}Mn_{0.08})_{1.00}O₃; 2 – Fe_{1.01}(Ti_{0.89}Mn_{0.09}Mg_{0.01})_{0.99}O₃.
 Некоторый избыток железа в последней формуле, вероятно, вызван тонкой структурой распада с образованием пластинок гематита в ильмените, едва различимых на рисунке 10б.

Гематит Fe₂O₃ образует скопления в кристаллах эгирина и полевого шпата, создавая эффект солнечного камня. Индивиды размером от долей миллиметра до 20 мкм (рис. 11в, г). Состав гематита практически соответствует стехиометрическому.

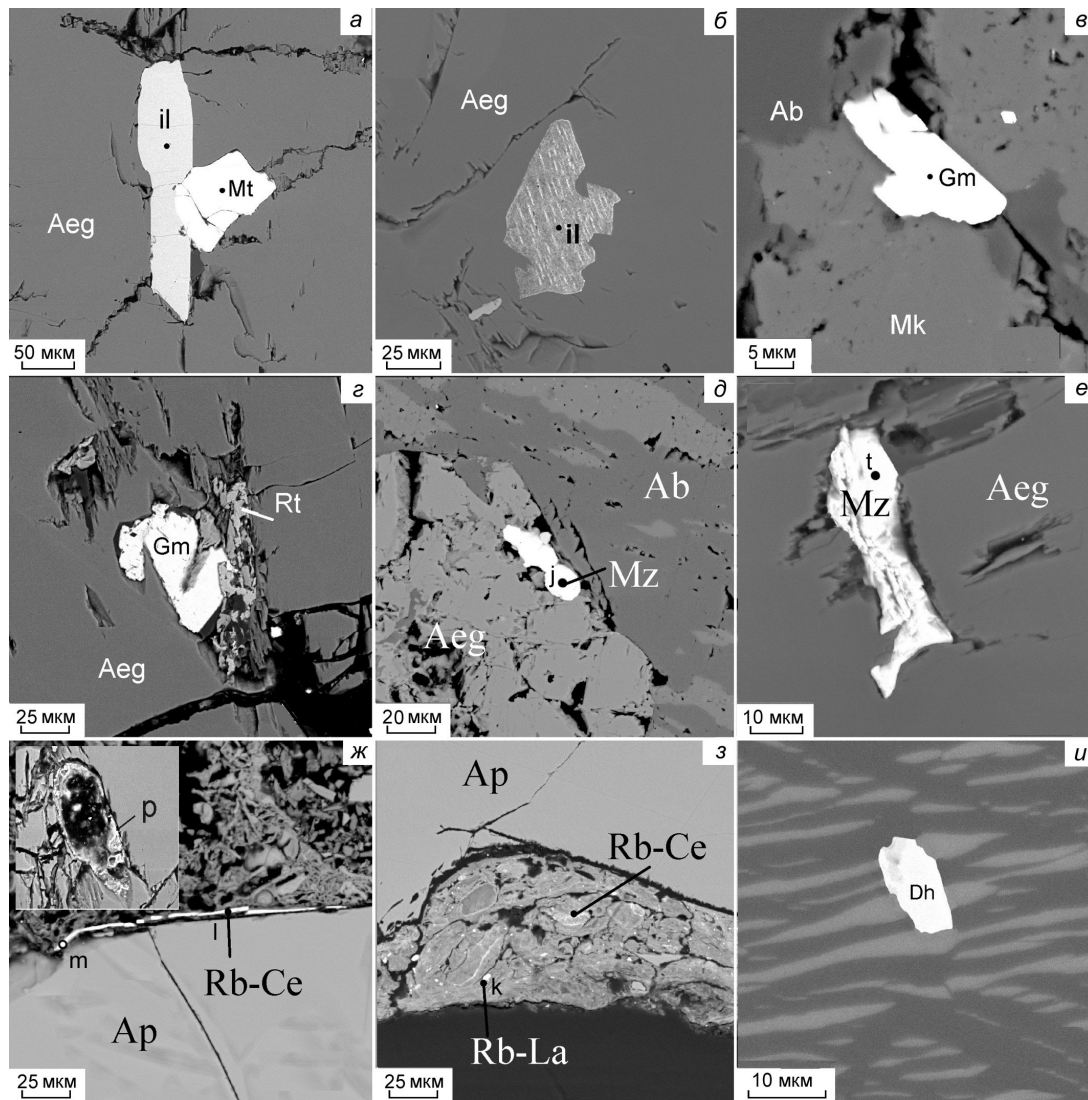


Рис. 11. Акцессорные минералы Fe, Ti, РЗЭ и дальнегорскит в пегматитах копи № 243: а – сросток ильменита (il) с магнетитом; б – структура распада в ильмените; в – пластинка гематита в мезопертите с микроклином и альбитом; г – рутил (Rt) и гематит в эгирине; д, е – зерна монацита (Mz) в эгирине и на контакте с мезопертитом; ж – корка рабдофана-(Ce) на апатите; з – рабдофан-(Ce) и рабдофан-(La) в оксидно-силикатных агрегатах на апатите; и – кристалл дальнегорскита (Dh) в мезопертите.

Fig. 11. Accessory Fe, Ti and REE minerals and dalnegorskite in pegmatites of mine no. 243: а – aggregate of ilmenite (il) and magnetite; б – exsolution structure in ilmenite; в – hematite plate in mesoperthite with microcline and albite; г – rutile (Rt) and hematite in aegirine; д, е – monazite grains (Mz) in aegirine and at the contact with mesoperthite; ж – rhabdophane-(Ce) crust on apatite; з – rhabdophane-(Ce) and rhabdophane-(La) in oxide-silicate aggregates on apatite; и – dalnegorskite crystal (Dh) in mesoperthite.

Рутил TiO_2 встречается изредка, по-видимому, как продукт разложения ильменита (рис. 11г). Химический состав рутила (мас. %) TiO_2 95.48, FeO 0.77, CaO 0.68, ZrO_2 0.42, Nb_2O_5 0.34, Ta_2O_5 1.11, WO_3 0.71, сумма 99.51. Эмпирическая формула имеет вид $(Ti_{0.97}Fe_{0.01}Ca_{0.01})_{0.99}O_2$ (расчет на один катион).

Гидроксиды Fe и Mn в зоне выветривания жил образуют корки в трещинах пород.

Монацит-(Ce) $CePO_4$ наблюдается в виде ксеноморфных выделений размером 25–50 мкм внутри кристаллов эгирина или на контактах пироксена с полевым шпатом (рис. 11д, е). В химическом составе монацита-(Ce) содержится значительное количество La: от 0.34 до 0.40 к.а.ф. (табл. 4, ан. t, j). Постоянными примесями являются Nd и Pr, кроме них отмечаются примеси Ca, Si, реже Fe и S.

Таблица 4

Химический состав монацита-(Ce) (t, j), рабдофана-(Ce) (m, l), рабдофана-La (k) и смеси рабдофана-La с оксидно-силикатным агрегатом (p), мас. %

Table 4

Chemical composition of monazite-(Ce) (t, j), rhabdophane-(Ce) (m, l), rhabdophane-La (k) and a mixture of rhabdophane-La with oxide-silicate aggregate (p), wt %

Точки анализов	t	j	m	l	k	p
Ce ₂ O ₃	34.24	34.43	31.69	26.67	3.50	2.02
La ₂ O ₃	27.32	23.25	23.23	19.10	20.52	14.18
Nd ₂ O ₃	5.61	6.84	6.22	5.89	13.74	9.60
Pr ₂ O ₃	2.38	2.66	2.75	1.60	3.76	2.48
FeO	0.44	–	0.95	1.32	1.40	8.61
MnO	–	–	–	0.92	2.21	1.08
CaO	0.28	0.26	0.37	1.41	3.64	3.73
SiO ₂	0.50	0.95	0.67	2.15	2.20	14.38
Al ₂ O ₃	–	–	–	0.75	1.88	4.96
P ₂ O ₅	28.23	28.67	27.61	25.82	24.67	17.75
SO ₃	0.24	–	–	–	0.96	0.49
H ₂ O*	–	–	6.56	13.71	16.89	17.08
Сумма	99.24	99.29	100.05	99.99	99.80	100.05

Формулы рассчитаны на два катиона

t – (Ce_{0.49}La_{0.40}Nd_{0.08}Pr_{0.03}Ca_{0.01}Fe_{0.01})_{1.03}(P_{0.94}Si_{0.02}S_{0.01})_{0.97}O₄

j – (Ce_{0.50}La_{0.34}Nd_{0.10}Pr_{0.04}Th_{0.02}Ca_{0.01})_{1.00}(P_{0.96}Si_{0.04})_{1.00}O₄

m – (Ce_{0.48}La_{0.35}Nd_{0.09}Pr_{0.04}Fe_{0.03}Ca_{0.02})_{1.01}(P_{0.96}Si_{0.03})_{0.99}O₄ × 0.9H₂O

l – (Ce_{0.41}La_{0.29}Nd_{0.09}Ca_{0.06}Fe_{0.05}Al_{0.04}Mn_{0.03}Pr_{0.02}Sr_{0.02})_{1.01}(P_{0.91}Si_{0.09})_{0.99}O₄ × 1.9H₂O

k – (La_{0.30}Ca_{0.16}Nd_{0.20}Mn_{0.07}Y_{0.06}Ce_{0.05}Pr_{0.05}Fe_{0.05}Al_{0.04}Sm_{0.02})_{0.96}(P_{0.83}Si_{0.09}S_{0.03}Al_{0.05})_{1.00}O₄ × 2.25H₂O

p** – 36521 (La_{0.33}Ca_{0.25}Nd_{0.22}Mn_{0.06}Y_{0.06}Ce_{0.05}Pr_{0.06})_{1.03}(P_{0.95}S_{0.02})_{0.97}O₄ × 2.25H₂O

Примечание. * – Содержание H₂O рассчитано из суммы анализа примерно 100 %; ** – рассчитано без Si, Al, Fe, Mg и K. Анализы дополнительно содержат (мас. %): j – 2.23 ThO₂; l – 0.65 SrO; k – 2.70 Y₂O₃; k – 1.73 Sm₂O₃; p – 1.43 MgO, 0.38 K₂O и 1.88 Y₂O₃. Положение точек анализов см. на рис. 11д–з.

Note. * – The H₂O content is calculated from the analytical total of ~100 %; ** – calculated without Si, Al, Fe, Mg and K. The analyses also contain (wt. %): j – 2.23 ThO₂; l – 0.65 SrO; k – 2.70 Y₂O₃; k – 1.73 Sm₂O₃; p – 1.43 MgO, 0.38 K₂O and 1.88 Y₂O₃. For the position of analytical points, see Figs. 11d–z.

Рабдофан-(Ce) (Ce,La)PO₄ · H₂O наблюдается в виде тонких пленок толщиной до 2 мкм в пустотах на поверхности кристаллов апатита и зерен в оксидно-силикатных продуктах, выполняющих пустоты в зернах апатита (рис. 11ж, з). Как и в монаците-(Ce), рабдофан-(Ce) содержит значительное количество La (табл. 4, ан. m, l). Набор примесей также сходен с таковыми в монаците, но отмечается несколько больше примесей Fe и Si, Ca, а также появляются Mn и Al.

Рабдофан-(La) (La,Ce)PO₄ · H₂O является продуктом изменения рабдофана-(Ce) (рис. 11з). При гидротермальном преобразовании Ce выщелачивается из минерала и возрастает содержание примесей Fe, Si, Mn, Al и Ca (табл. 4, ан. k), присутствие которых связано с механическими примесями. При исключении петрогенных элементов, кристаллохимическая формула идентична рабдофану-(La) (анализы p и k, табл. 4).

Дальнегорскит Ca₅Mn(Si₃O₉)₂ найден в кристалле мезопертита в виде слегка удлиненного зерна размером около 10 мкм (рис. 11и). Химический состав минерала (мас. %): SiO₂ 50.39, FeO 3.16, MnO 10.48, MgO 1.13, CaO 34.47, BaO 0.71, K₂O 0.09, сумма 100.43. Кристаллохимическая формула (Ca_{4.39}Fe_{0.31}Mg_{0.20}Ba_{0.03}K_{0.01})_{5.94}Mn_{1.06}Si_{5.99}O₁₈ (расчет на 12 катионов) отвечает открытому недавно минералу дальнегорскиту (Щипалкина и др., 2019).

Обсуждение

В результате проведенных исследований установлена следующая смена минеральных ассоциаций. К наиболее раннему парагенезису относятся друзово-блоковые полевошпатовые агрегаты. В результате деформаций второго этапа в трещинах кристаллизовались агрегаты, состоящие преимущественно из эгирина с подчиненным количе-

ством полевого шпата. Наряду с новыми генерациями полевого шпата в агрегате регенерировались и дорастали ранее образовавшиеся индивиды. Кристаллизация минералов второго этапа сопровождалась образованием апатита. Ранние генерации апатита в виде включений располагались по зонам роста кристаллов полевого шпата. Основное количество апатита, образующего мономинеральные блоки в западном пегматитовом теле, отлагалось либо совместно с эгирином, либо до него. Здесь агрегаты апатита составляют не менее 30 % объема пегматитовой жилы. Параллельно-шестоватое строение второго типа апатитовых агрегатов указывает на медленное раскрытие вмещающей их полости при их кристаллизации.

В третий этап деформаций образовались новые пологие трещины, которые зарастали друзовыми агрегатами эгирина с полевым шпатом, апатитом и кальцитом. Кальцит заполнял остаточные полости, но в начале кристаллизации кальцит имел индукционные поверхности совместного роста с другими минералами. На стенки наиболее поздних секущих трещин и миароловых пустот нарастали кристаллы кварца и ферривинчита. За небольшим исключением, для всего периода формирования пегматитовых жил характерен постоянный состав кристаллизующихся минералов.

Пегматиты копи № 243 отличаются от известных жил сиенит-пегматита Ильменского государственного заповедника (например, копей №№ 15 и 158) лучшими коллекционными друзами эгирина. Необычным в жилах оказалось высокое содержание апатита. Ранее в Ильменских горах наибольшие содержания апатита обнаруживались в миаскит-пегматитах, обычно в приконтактной зоне кальцитовых сердечников пегматитовых жил (копь № 6, жилы Савельева лога, гор Фирсовой и Лохматой). В сиенит-пегматитах апатит встречался практически во всех жилах, но в незначительных количествах (Попов, Попова, 2006). В копи № 243 мономинеральные апатитовые участки в западном пегматитовом теле достигают 50 см.

Дальнегорскит впервые определен для Урала. В бороносных известковых скарнах Дальнегорского месторождения (место первичной находки) этот минерал ранее принимался за волластонит. В 2018 г. были проведены углубленные исследования состава и структуры волластонита и он был отнесен к пироксеноидам со структурой бустамита (Щипалкина и др., 2019).

В описанных жилах пегматитов выделения ферривинчита незначительны. При дальнейшей расчистке копи по простиранию жил можно ожидать присутствие более существенных количеств Na-Ca-амфибол-асбеста. Так, в эгирин-полевошпатовой жиле, находящейся в 100 м восточнее от копи № 243, ранее были обнаружены крупные выделения ферривинчита в виде асбеста с длиной волокна до 20 см (Баженов, Макагонов, 2005).

Выводы

Впервые рассмотрены жилы сиенит-пегматитов копи № 243 Ильменского государственного заповедника, находящиеся в фенитовом ореоле юго-восточного контакта Селянkinского сиенитового массива. По соотношению между альбитовой и микроклиновой фазами, полевым шпатом, слагающий жилы, относится к мезопертиту. Полости в пегматитах выполнены радиально-лучистыми и призматическими кристаллами эгирина. В составе пегматитов установлены альбит, микроклин, эгирин, гидроксилapatит, фторapatит, кальцит, титанит, чевкинит-(Ce), магнетит, ильменит, гематит, рутил, гидроксиды Fe и Mn, монацит-(Ce), рабдофан-(Ce), рабдофан-(La), дальнегорскит. Исходя из структурно-текстурных особенностей породообразующих минералов, жилы пегматитов являются синтетектоническими, декомпрессионными, ранние минеральные ассоциации в них подвергались катаклазу и регенерации. Изучение минерального состава жил современными методами позволило выявить дальнегорскит – новый для Урала минерал. Минеральные ассоциации в дальнейшем позволят уточнить процессы формирования пегматитов и непосредственно Ильмено-Вишневогорского комплекса. В результате работы получены структурно-вещественные характеристики коллекционных друз эгирина, выставленные в демонстрационных залах музея Ильменского государственного заповедника и пополнен новыми данными паспорт копи № 243.

Исследования проводились в рамках государственной темы «Структурно-вещественная эволюция полиметаморфических и магматических комплексов Южного Урала: петрология, геохимия, минералогия».

Литература

Баженов А.Г., Иванов Б.Н., Кутепова Л.А., Левин В.Я., Роненсон Б.М., Утенков В.А. (1976) О вещественном составе пироксен-полевошпатовых пород северной части ильменогорского комплекса. *Труды Ильменского государственного заповедника*, (15), 3–11.

Баженов А.Г., Макагонов Е.П. (2005) Na-Ca-амфибол-асбест в щелочном комплексе Ильменских гор. *Уральский минералогический сборник*, (15), 56–59.

Левин В.Я., Роненсон Б.М., Утенков В.А., Баженов А.Г., Левина А.А., Кутепова Л.А. (1974) Новые данные о геологическом строении северной части ильменогорского комплекса. *Ежегодник-1973. Труды ИГГ УрО АН СССР*. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 52–55.

Попов В.А., Попова В.И. (2006) Минералогия пегматитов Ильменских гор. *Минералогический альманах*, **9**, 152.

Щипалкина Н.В., Пеков И.В., Ксенофонтов Д.А., Чуканов Н.В., Белаковский Д.И., Кошлякова Н.Н. (2019) Дальнегорскит, $\text{Ca}_5\text{Mn}(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$, новый пироксеноид структурного типа бустамита, породообразующий минерал известковых скарны Дальнегорского борного месторождения (Приморский край, Россия). *Записки РМО*, **148**(2), 61–75.

References

Bazhenov A.G., Ivanov B.N., Kutepova L.A., Levin V.Y., Ronenson B.M., and Utenkov V.A. (1976) [Composition of pyroxene-feldspar rocks of the northern part of the Ilmenogorsky complex]. *Trudy Ilmenskogo gosudarstvennogo zapovednika [Proceedings of the Ilmeny State Reserve]*, (15), 3–11. (in Russian)

Bazhenov A.G., Makagonov E.P. (2005) [Na-Ca-amphibole-asbestos in an alkaline complex of the Ilmeny Mountains]. *Uralsky mineralogicheskyy sbornik [Urals Mineralogical Collection]*, (15), 56–59. (in Russian)

Levin V.Y., Ronenson B.M., Utenkov V.A., Bazhenov A.G., Levina A.A., Kutepova L.A. (1974) [New data on geological structure of the northern part of the Ilmenogorsky complex]. *Ezhegodnik-1973. Trudy IGG UrO AN SSSR [Yearbook-1973. Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry UB AS SSSR]*. 52–55. (in Russian)

Popov V.A., Popova V.I. (2006) [Mineralogy of pegmatites of the Ilmeny Mountains]. *Mineralogicheskyy almanakh [Mineralogical Almanac]*, **9**, 152. (in Russian)

Shchipalkina N.V., Pekov I.V., Ksenofontov D.A., Chukanov N.V., Belakovskiy D.I., Koshlyakova N.N. (2019) Dalnegorskite, $\text{Ca}_5\text{Mn}(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$, a new pyroxenoid of the bustamite structure, a rock-forming mineral of calcic skarns of the Dalnegorsk boron deposit (Primorsky krai, Russia). *Geology of Ore Deposits*, **61**, 756–766.