

УДК 549.642.3

**ЭВОЛЮЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ
ЭГИРИНА ПРИ СТАНОВЛЕНИИ ВИШНЕВОГОРСКОГО
ЩЁЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)****Е.П. Макагонов, С.А. Репина, В.А. Котляров***Институт минералогии УрО РАН г. Миасс, Россия; mak@mineralogy.ru***EVOLUTION OF CHEMICAL COMPOSITION AND CRYSTAL MORPHOLOGY
OF AEGIRIN DURING FORMATION OF THE VISHNEVOGORSK ALKALINE
CARBONATITE COMPLEX (SOUTH URALS)****E.P. Makagonov, S.A. Repina, V.A. Kotlyarov***Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, Russia; mak@mineralogy.ru*

В процессе становления Вишневогорского щёлочно-карбонатитового комплекса изменялся химический состав и морфология кристаллов эгирина. При фенитизации вмещающих метаморфических пород, ранних жильных сиенитов и пегматитов кристаллизовались пироксены с минимальными содержаниями эгиринового минала (до 57 %) и примитивной «геденбергитовой» огранкой кристаллов. Эгиринам этого типа сопутствует алланит-(Ce) минерализация. В следующий период, при формировании сиенит-пегматитов и карбонатитов, в кристаллах эгирина появились грани дополнительных призм, а эгириновый минал в их составе достиг 70 %. К породам пегматитовой стадии приурочены повышенные концентрации пирохлора. В жилах альпийского типа устанавливается смена габитуса кристаллов от призматического с плоскими вершинами до длиннопризматического с острыми вершинами. Цвет кристаллов изменяется от зелёно-чёрного до зелёного. На кристаллах с острыми вершинами наблюдается наибольшее разнообразие простых форм: вертикальные призмы $\{hk0\}$ в комбинации с формами $\{hh1\}$, $\{hk1\}$ с полярными координатами ρ 65° и более. На BSE-фото этих эгиринов чётко проявляется зонально-секториальное строение, смена кристаллографических форм и фантомные включения пироксенов ранних генераций. Содержание эгиринового минала достигает 98 %. При возрастании количества Na количество Fe сначала возрастает, а затем несколько уменьшается. Содержание Ca, Mg, Al, Mn уменьшается с увеличением натриевого компонента, а содержание Ti и V увеличивается. Эгиринам альпийских жил сопутствуют минералы редких земель и редких металлов.

Илл. 9. Табл. 3. Библ. 10.

Ключевые слова: эгирин, сиенит, миаскит, фенит, карбонатит, Вишневогорский щёлочно-карбонатитовый комплекс, Южный Урал.

The chemical composition and crystal morphology of aegirine changed during formation of the Vishnevogorsk alkaline carbonatite complex. Fenitization of host metamorphic rocks, early vein syenites and pegmatites resulted in crystallization of pyroxenes with minimal content of aegirine end-member (up to 57 %) and primitive «hedenbergite» cut. Aegirine of this type is accompanied by alanite-(Ce). During next period (formation of syenite-pegmatites and carbonatites), aegirine crystals were supplied by additional prism and the amount of aegirine end-member reached 70 %. The rocks of the pegmatite stage are characterized by the higher amount of pyrochlore. Aegirine of the Alpine-type veins changes its crystal habit from prismatic to long-prismatic with flat and sharp apices, respectively. The color of crystals varies from green-black to green. The crystals with sharp apices

are most diverse in respect to simple forms showing vertical prisms $\{hk0\}$ in combination with forms $\{hh1\}$ and $\{hk1\}$ with polar coordinates r 65° and more. BSE images of them demonstrate zonal-sectorial structure and phantom inclusions of pyroxenes of early generations. The amount of aegirine end-member attains 98 %. The increase in Na content is accompanied, first, by the increase and, then, the decrease in the Fe content. The Ca, Mg, Al and Mn contents decrease with increasing Na component, whereas the Ti and V contents increase. Aegirine of the Alpine-type veins is associated with minerals of rare earth elements and rare metals.

Figures 9. Tables 3. References 10.

Key words: aegirine, syenite, miaskite, fenite, carbonatite, Vishnevogorsk alkaline carbonatite complex, South Urals.

Введение

Форма кристаллов является одним из наиболее чувствительных индикаторов состояния геологической среды. Изменение формы кристаллов во времени и пространстве позволяет определить особенности протекания и эволюции геологического процесса, а также использовать форму кристаллов в качестве поискового критерия. Среди минералов щелочных пород удобным объектом для этих целей служит эгирин. В щёлочно-карбонатитовом комплексе Вишнёвых гор начало кристаллизации эгирина связано с фенитизацией горных пород, вмещающих миаскитовый массив. Последующее выделение эгирина происходило при формировании сиенит-пегматитов и карбонатитовых тел. Наиболее поздние выделения эгирина приурочены к пневматолитово-гидротермальным жилам альпийского типа. Генетические разновидности пироксена имеют разный химический состав, что является важным для использования эгирина в качестве полезного ископаемого при изготовлении керамических изделий, облицовочных плиток, глазурей, огнеупорных покрытий.

Кристаллы эгирина измерены на гониометре ZRG-3 – аналитик Е.П. Макагонов. Химический состав эгиринов определён в Институте минералогии УрО РАН на рентгеновском микроанализаторе РЭММА-202М с ЭДС приставкой LZ-5 при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда $3 \cdot 10^{-3}$ А и диаметре пучка электронов 5 мкм – аналитик В.А. Котляров.

Эгирин из фенитов

Первые генерации эгирина связаны с начальным периодом фенитизации горных пород, вмещающих щелочной массив. В Вишневогорском щёлочно-карбонатитовом комплексе фениты занимают более 50 % (рис. 1). Процесс фенитизации

пород сопровождался заложением сети трещин с формированием системы жильных тел сиенитов и полевошпат-биотит-амфибол-пироксеновых пегматитов. При фенитизации эгирином замещался преимущественно кварц гнейсов, гранитов, ранних пегматитовых и кварцевых жил.

В результате замещения эгирином кварца и других минералов были образованы зернистые агрегаты, нередко с сохранением текстурного рисунка первичных пород. В ранних пегматитах, сопряжённых с фенитизацией, текстура агрегатов с эгирином изменялась во времени от параллельно-шестоватой до блочной. В пироксеносодержащих породах отмечаются ассоциации эгирина с микроклином, алланитом-(Ce), магнетитом, титанитом, ильменитом, апатитом, реже с урансодержащим пироксеном, рутилом и другими минералами.

Индивиды эгирина ранних периодов кристаллографически весьма несовершенны (рис. 2). Габитус индивидов чаще всего короткопризматический; цвет эгирина зеленовато-чёрный. Различаются грани форм $\{110\}$, $\{010\}$, $\{100\}$ и $\{001\}$, изредка – грани форм $\{110\}$, $\{\bar{1}11\}$, $\{\bar{1}01\}$. В химическом составе пироксена содержание эгиринового минала колеблется от 37 до 57 % (табл. 1, ан. 1–3), на диоксидовый минал приходится 17–26 % (Роненсон, 1966; Левин и др., 1997). Сумма миналов геденбергита с ферросилитом составляет от 8 до 30 %. Между содержаниями эгириновой составляющей и суммы миналов геденбергита с ферросилитом устанавливается чёткая обратная корреляционная связь. Обычны в пироксене повышенные содержания Al, Mn, реже K. Отнесение пироксенов такого состава к эгиринам произведено согласно рекомендациям ММА (Morimoto, 1989, Morimoto et al., 1988). Ранее для пироксенов применялись термины эгирин-дипсид, эгирин-геденбергит, эгирин-салит, эгирин-авгит.

В конце периода фенитизации происходило разогревание системы и повышение давления, в ре-

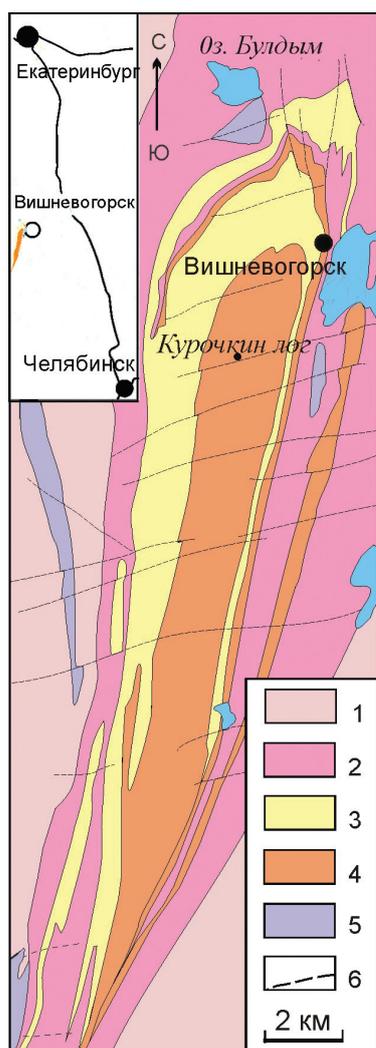


Рис. 1. Схема геологического строения Вишневогорского массива по (Левин и др., 1997 с упрощением).

1 – метаморфические толщи рифея: плагиогнейсы, амфиболиты, кварциты; 2 – метаморфические толщи протерозоя: амфиболиты, плагиогнейсы, кварциты, диопсид-скаполитовые породы; 3 – миаскиты; 4 – фениты; 5 – метагипербазиты; 6 – тектонические разломы.

Fig. 1. Scheme of geological structure of the Vishnevogorsk complex simplified after (Levin et al., 1997).

1 – Riphean metamorphic strata: plagiogneisses, amphibolites, quartzites; 2 – Proterozoic metamorphic strata: amphibolites, plagiogneisses, quartzites, diopside-scapolite rocks; 3 – miaskites; 4 – fenites; 5 – metaultramafic rocks; 6 – faults.



Рис. 2. Выделения эгирина в фените и сиенит-пегматите, зоны 125.

Fig. 2. Aggregates of aegirine in fenite and syenite-pegmatite on the zone 125.

зультате которого породы фенитового ореола подверглись реологическим преобразованиям. Это подтверждается широким развитием будинированных пород в пределах щелочного комплекса (рис. 3).

Эгирин из сиенит- и миаскит-пегматитов

Следующий период развития комплекса Вишневогорских гор связан с заложением новой системы открытых трещин. В начале этого периода происходило формирование жильных тел сиенит-пегматитов с друзовыми агрегатами эгирина с микроклинпертитом, биотитом, амфиболом, фторапатитом, титанитом, сульфидами, магнетитом, ильменитом, пироксеном, изредка с монацитом и другими сопутствующими минералами. С сиенит-пегматитами и миаскит-пегматитами связаны наиболее значимые проявления пироксеновых руд.

Становление системы пегматитовых жил совпадает с началом формирования миаскитовых и

карбонатных тел. Выделения кальцита отмечаются в остаточных пустотах пегматитовых жил, в межбудинных промежутках деформированных ранних жил и в собственных карбонатных телах. Для ранних генераций кальцита устанавливаются поверхности частичного совместного роста с другими минералами этого периода, в том числе и с эгирином.

Цвет эгирина этого периода тёмно-зелёный до чёрного. Кристаллы эгирина призматические с относительно простой огранкой. Размеры кристаллов по длинной оси достигают 15 см. Главные формы кристаллов $\{110\}$, $\{001\}$, $\{010\}$; менее развиты грани форм $\{100\}$, $\{\bar{1}01\}$, $\{011\}$ (рис. 4).

В составе этого пироксена возрастает содержание эгириновой минала до 70 %, а доля диопсидового минала снижается до 20 % (см. табл. 1, ан. 4). Во внешних зонах кристаллов увеличивается содержание эгириновой компоненты до 74 % (см. табл. 1, ан. 5).

Таблица 1

Химический состав эгирина из фенитов Вишневогорского миаскитового массива (мас. %)

Table 1

Chemical composition of aegirine from fenites of the Vishnevogorsk miaskite block (wt. %)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	50.80	50.25	49.56	52.20	52.21	51.22	50.48	50.48	49.99	50.74
TiO ₂	0.58	0.56	0.38	0.69	0.47	0.54	0.38	0.50	0.43	0.63
Al ₂ O ₃	2.74	1.84	–	1.52	1.32	2.74	1.85	1.25	0.76	2.20
Fe ₂ O ₃	16.85	16.72	27.47	24.07	26.11	26.35	22.33	30.04	31.89	27.71
FeO	6.69	6.60	4.54			1.90	4.77	1.10	0.29	1.77
MnO	0.72	0.59	1.04	0.70	0.60	0.38	0.73	0.39	0.32	0.27
MgO	4.10	4.49	3.69	3.44	2.50	2.42	2.44	1.52	1.23	1.92
CaO	9.20	10.59	8.36	7.44	5.27	2.82	8.36	2.80	2.95	3.13
Na ₂ O	7.30	6.13	4.12	9.94	11.52	10.14	8.06	9.18	10.53	7.34
K ₂ O	0.45	0.17	0.81	–	–	0.84	0.24	1.26	0.63	3.14
F	–	0.12	–	–	–	–	–	–	–	–
H ₂ O ⁺	0.42	1.07	–			0.10	–	0.42	0.30	0.60
H ₂ O ⁻	–	–	–			0.20	0.10	0.26	0.18	0.30
Сумма	99.85	99.13	99.97	100.00	100.00	99.95	99.74	99.20	99.50	99.75
Формулы рассчитаны на 4 катиона										
1. (Na _{0.57} Ca _{0.38} Fe ²⁺ _{0.05}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.64} Mg _{0.23} Al _{0.08} Mn _{0.02} Ti _{0.02} Fe ²⁺ _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.95} Al _{0.05}) _{2.00} O ₆ ; 2. (Na _{0.48} Ca _{0.45} Fe ²⁺ _{0.08}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.61} Mg _{0.26} Al _{0.06} Fe ²⁺ _{0.03} Mn _{0.02} Ti _{0.02}) _{1.00} (Si _{1.98} Al _{0.02}) _{2.00} O ₆ ; 3. (Na _{0.37} Ca _{0.36} Fe ²⁺ _{0.22} Mg _{0.05}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.77} Mg _{0.17} Mn _{0.04} Ti _{0.01}) _{0.99} Si _{2.01} O ₆ ; 4. (Na _{0.73} Ca _{0.27}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.68} Mg _{0.19} Al _{0.05} Ca _{0.03} Mn _{0.02} Ti _{0.02} Fe ²⁺ _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.98} Al _{0.02}) _{2.00} O ₆ ; 5. (Na _{0.84} Ca _{0.16}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.74} Mg _{0.14} Ca _{0.06} Al _{0.03} Mn _{0.02} Ti _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.97} Al _{0.03}) _{2.00} O ₆ ; 6. (Na _{0.80} Ca _{0.12} Mg _{0.05} Fe ²⁺ _{0.04}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.78} Mg _{0.09} Al _{0.09} Ti _{0.02} Mn _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.97} Al _{0.03}) _{2.00} O ₆ ; 7. (Na _{0.62} Ca _{0.35} Fe ²⁺ _{0.03}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.73} Mg _{0.14} Al _{0.05} Fe ²⁺ _{0.04} Mn _{0.02} Ti _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.96} Al _{0.04}) _{2.00} O ₆ ; 8. (Na _{0.77} Ca _{0.12} Fe ²⁺ _{0.09} Mg _{0.03}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.85} Mg _{0.06} Al _{0.06} Mn _{0.01} Ti _{0.01}) _{1.00} (Si _{2.00}) _{2.00} O ₆ ; 9. (Na _{0.83} Ca _{0.12} Fe ²⁺ _{0.03} Mg _{0.01}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.91} Mg _{0.06} Mn _{0.01} Ti _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.96} Al _{0.04}) _{2.00} O ₆ ; 10. (Na _{0.72} Ca _{0.13} Fe ²⁺ _{0.11} Mg _{0.03}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.78} Al _{0.10} Mg _{0.08} Ti _{0.02} Mn _{0.01}) _{0.99} Si _{2.01} O ₆ .										

Примечание. Вмещающие породы: 1 – фенит (Левин и др., 1997); 2 – фенит карбонатизированный, среднее из пяти анализов (Левин и др., 1997); 3 – обособление пироксена в фените (Роненсон, 1966); 4, 5 – сиенит-пегматит (Попов и др., 2016); 6, 7 – миаскит-пегматит альбитизированный (Бонштедт-Куплетская, 1951); 8–10 – жилы альпийского типа в фенитах: 8 – среднее из трёх анализов (Роненсон, 1966); 9, 10 – (Доброхотова, 1992). Анализы: 1–3, 6–10 – силикатный; 4, 5 – микрозондовый; прочерк – не обнаружено; пустая клетка – не определялась.

Note. Host rocks: 1 – fenite (Levin et al., 1997); 2 – carbonated fenite, average of five analyzes (Levin et al., 1997); 3 – pyroxene from fenite (Ronenson, 1966); 4, 5 – syenite-pegmatite (Popov et al., 2016); 6, 7 – albitized miaskite-pegmatite (Bonshtedt-Kupletskaya, 1951); 8–10 – Alpine-type veins in fenites: 8 – average of three analyzes (Ronenson, 1966); 9–10 – (Dobrokhotova, 1992). 1–3, 6–10 – chemical analysis; 4–5 – microprobe analysis. Dash, not detected; empty boxes – not analyzed.

Кристаллы эгирина в альбитовых агрегатах из миаскит-пегматитов восточного эндоконтакта миаскитового массива подобны описанным выше, но содержание эгиринового минала в них достигает 78 % (см. табл. 1, ан. 6).

В районе Курочкина лога (рудник «Шпат») миаскит-пегматит содержит крупные двойники индивидов эгирина по (100) (рис. 5), достигающие длины 80 см при ширине до 12 см и толщине до 3 см (Бонштедт-Куплетская, 1951). Цвет эгирина буровато-чёрный. На индивидах двойников развиты грани форм {100}, {110}, {001}. Между индивидами двойников иногда наблюдаются просечки, выполненные полевыми шпатами. Часто пироксен

насыщен пойкилитовыми вростками альбита. По индукционным поверхностям устанавливается частично одновременный рост эгирина с микроклипертитом, альбитом, нефелином. В этой же ассоциации наблюдаются кальцит, титанит, канкринит, апатит, анальцит и др.

В химическом составе эгириновый минал составляет 62 %, количество диоксидового и геденбергитового компонентов примерно равное – по 12–14 % (см. табл. 1, ан. 7).

Подобные двойники эгирина в такой же ассоциации встречены нами на северо-западном эндоконтакте миаскитового массива. Размер двойников до 1 см. Индивиды эгирина имеют грани форм

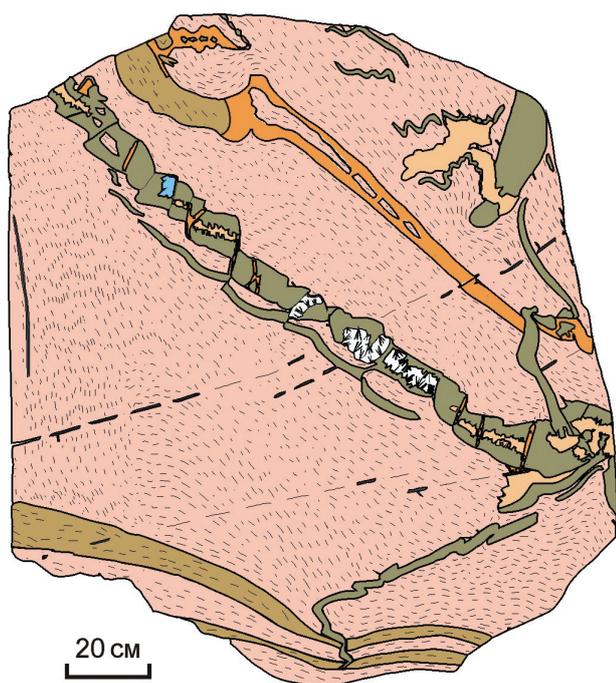


Рис. 3. Будинированные жилы эгирина в фенитах зоны 125.
 1 – эгириновый фенит; 2 – биотитовый фенит; 3 – мелкозернистая полевошпатовая порода; 4 – агрегаты эгирина; 5 – пегматоидный микроклин; 6 – кальцит; 7 – амфибол; 8 – жилки с щелочным амфиболом, кварцем, карбонатом, эгирином.

Fig. 3. Boudinated veins of aegirine in fenites on the zone 125.
 1 – aegirine fenite; 2 – biotite fenite; 3 – fine-grained feldspar rock; 4 – aggregates of aegirine; 5 – pegmatoid microcline; 6 – calcite; 7 – amphibole; 8 – veins with alkali amphibole, quartz, carbonate, aegirine.



Рис. 4. Кристалл эгирина с альбитом из сиенит-пегматитов.

Fig. 4. Aegirine crystal with albite from syenite-pegmatites.



Рис. 5. Двойники эгирина в миаскит-пегматите, Курочкин лог.

Fig. 5. Aegirine twins in miaskite-pegmatite on the Kurochkin Log.

{100}, {110}, { $\bar{3}02$ } (рис. 6а). Здесь же находятся своеобразные срастания двойников в виде розеток размером до 0.5 см (см. рис. 6б).

Эгирин из альпийских жил

Более поздние выделения эгирина приурочены к жилам альпийского типа в экзоконтактовой зоне миаскитового массива. Образования этого периода включают 3/4 минеральных видов, известных в Вишнёвых горах. Период образования альпийских жил охватывает промежуток от времени становления основных карбонатитовых тел до современно-

го минералообразования. В течение этого периода периодически возобновлялись тектонические движения, приводящие к раскрытию трещин и к формированию штокверкообразных структур. Судя по парагенетическим ассоциациям, в этот период осуществлялся переход от пневматолито-гидротермальных к гидротермальным обстановкам. В ассоциации с эгирином отмечался щелочной амфибол, адуляр, циркон, тремолит, альбит, кварц, рутил, хлорит и др. (Чесноков, 1963), а также карбонаты Sr и редких земель.

Кристалломорфологический анализ. Морфологические разновидности с промежуточными

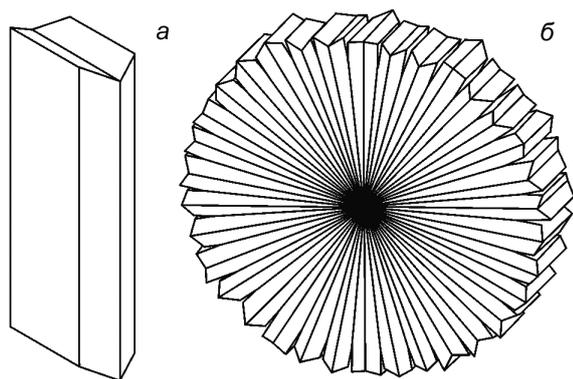


Рис. 6. Двойник срастания по (100) и розетка из двойников эгирина.

Fig. 6. Intergrowth twin along (100) and a rosette of actinolite twins.

типами, отражающими ряд генераций эгирина с последовательной сменой форм кристаллов, представлены на рис. 7. Облик кристаллов эгирина в течение периода изменялся от плосковершинного до островершинного.

Среди кристаллов эгирина в жилах альпийского типа можно выделить 5 основных морфологических типов. Эгирин-1 обычно наблюдается в срастаниях с полевыми шпатами, щелочными амфиболами, нефелином, титанитом, апатитом, пироксеном, сульфидами. Кристаллы чёрного цвета короткопризматические и призматические (см. рис. 7а). Наиболее развиты формы $\{110\}$, $\{\bar{1}01\}$, менее – $\{130\}$, $\{310\}$, $\{111\}$, $\{010\}$.

Эгирин-2 отмечается в зальбандах карбонатитовых жил в ассоциации с пироксеном, стронциевыми карбонатами, апатитом, ильменитом и др. Индивиды эгирина-2 меняют окраску от тёмно-зелёной до чёрной. На кристаллах развиты грани форм $\{110\}$, $\{001\}$, $\{131\}$, менее развиты – $\{130\}$, $\{310\}$, $\{111\}$, $\{010\}$, $\{100\}$ (см. рис. 7б). Кроме того, проявляются многочисленные относительно узкие грани в поясе $[\bar{1}10]$ с символами от $(\bar{1}11)$ до $(\bar{8}81)$ и более.

Эгирин-3 образует призматические островершинные кристаллы тёмно-зелёного цвета. Ассоциирует с микроклином, щелочными амфиболами, кальцитом, баритом, рутилом, алланитом, реже с кварцем. Габитусные грани формы $\{110\}$ дополняются гранями форм $\{111\}$, $\{131\}$ и $\{111\}$, второстепенные – $\{010\}$, $\{111\}$ (см. рис. 7д). Часто отмечаются грани из пояса $[110]$ с символами $\{310\}$, $\{320\}$, $\{130\}$. Подобные кристаллы описывались ранее (Бонштедт-Куплетская, 1951; Чесноков, 1963).

Эгирин-4 встречается в виде отдельных кристаллов и друзочек кристаллов в наиболее поздних жильных образованиях, часто в зияющих трещинах. Ассоциирует с щелочными амфиболами, альбитом, титанитом, рутилом, карбонатами Ca, Mg, Fe, иногда в парагенезисе с кварцем. Минерал зелёного цвета, просвечивает в массе. Кристаллы часто копьевидные, удлиненные (см. рис. 7ж, з). Из вертикальных призматических форм наиболее развиты грани призмы $\{110\}$, дополненные гранями форм $\{120\}$, $\{130\}$ и др. Вершины образованы комбинацией форм $\{\bar{h}h1\}$, $\{hk1\}$ и других с полярными координатами граней ρ от 65° и более.

Эгирин-5 образует игольчатые кристаллы, и сноповидные агрегаты. Часто наблюдается в срастаниях с кристаллами карбонатов, полевых шпатов или в виде включений в породообразующих минералах. Характерны включения эгирина-5 в кристаллах дымчатого кварца.

У тёмно-зелёных призматических разновидностей кристаллов с огранкой, характерной для эгиринов типа 1–3, часто наблюдается каёмка ярко-зелёного цвета. С другой стороны, внутри островершинных ярко-зелёных кристаллов эгирина-4 отмечаются фантомные кристаллы тёмно-зелёных призматических разновидностей с огранкой, характерной для эгиринов типа 1–3.

Химический состав. По литературным данным в химическом составе пироксена из альпийских жил содержание эгириновой молекулы составляет 72–83 % (см. табл. 1, ан. 8–10). На диопсидовый и геденбергитовый миналы приходится по 5–8 %. Из элементов-примесей отмечаются Ti, Mn, K.

Для определения влияния химического состава на форму кристаллов было отобрано из «альпийских» жил 18 индивидов, характеризующих основные и промежуточные типы кристалломорфологического ряда эгиринов. На рисунке 8 представлены графики составов химических элементов, построенные с учётом ранжирования проб по возрастанию содержания Na. При хорошо выраженных колебаниях содержания элементов по отношению к натрию заметно, что в среднем при возрастании количества Na количество Fe сначала увеличивается, а затем несколько уменьшается. Содержание Ca, Mg, Al, Mn уменьшается с увеличением натриевого компонента, а содержание Ti и V увеличивается.

Эти тенденции подтверждаются корреляционным анализом. По положительным коэффициентам корреляции по всей выборке выделяются две группы элементов. Сильная положительная связь

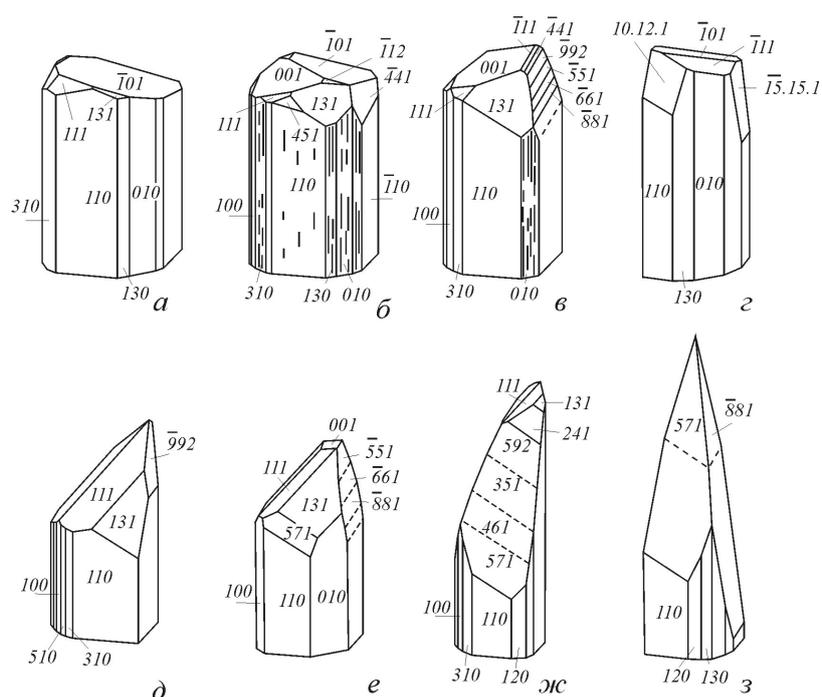


Рис. 7. Кристалломорфологический ряд эгиринов Вишневогорского щелочного комплекса (см. текст).
 Fig. 7. Crystal morphological series of aegirine of the Vishnevogorsk alkaline complex (see text).

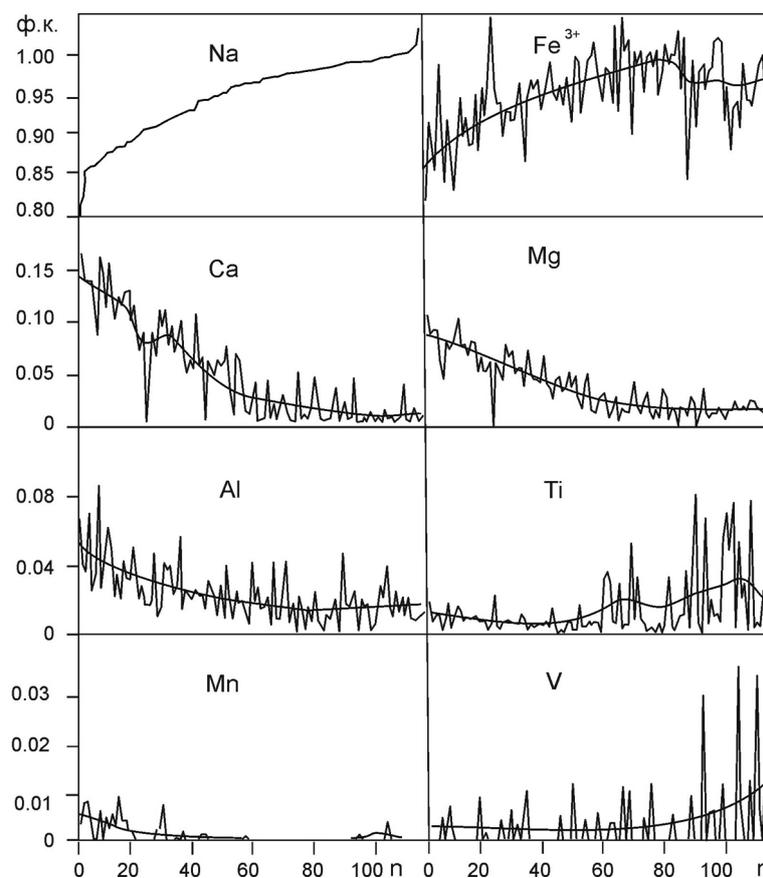


Рис. 8. Графики изменения формульных коэффициентов в эгиринах.
 ф.к. – формульные коэффициенты; n – номер анализа в ранжированном ряду по содержанию натрия.
 Fig. 8. Variation plots of formula units of aegirine.
 ф.к. – formula units; n – number of analysis in a ranked row by Na content.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между химическими элементами в эгиринах Вишневогорского массива

Table 2

Correlation coefficients between chemical elements in aegirine of the Vishnevogorsk block

n = 111	Mg	Al	Mn	Na	Fe	Ti	V	Si
Ca	0.96	0.70	0.62	-0.90	-0.72	-0.31	-0.18	-0.01
Mg		0.70	0.64	-0.86	-0.76	-0.24	-0.18	0.01
Al			0.45	-0.60	-0.80	-0.20	0.05	-0.41
Mn				-0.59	-0.51	-0.02	-0.15	-0.12
Na					0.50	0.31	0.26	0.15
Fe						-0.20	0.05	-0.41
Ti							-0.17	0.01
V								-0.02

Примечание. Количество анализов – 111. Граничные значения для уровня 0.99 равно 0.25, для уровня 0.95 равно 0.20.

Note. The number of analyses – 111. The boundary values for the level 0.99 are 0.25, for the level 0.95 – 0.20.

определяется между элементами Ca, Mg, Al и Mn. При этом наиболее высокая корреляция у пары Ca–Mg, равная 0.96, и наименьшая у пары Al–Mn, равная 0.45 (табл. 2). Менее значимая положительная корреляция отмечается у Na с Fe, Ti, V, Si. Парные корреляционные связи между элементами Fe, Ti, Si и V либо слабые отрицательные, либо незначимые.

Между элементами кальциевой и натриевой групп отмечается отрицательная корреляция, соответствующая классической схеме изоморфизма $\text{Ca} + \text{Mg} \leftrightarrow \text{Na} + \text{Fe}^{3+}$. Эта зависимость наиболее контрастно проявляется для химических анализов ранних генераций и уменьшается по мере смены кристаллографических форм. В анализах с некоторым избытком натрия, часть Fe^{3+} заменяется на сумму Ti + Al.

Соответственно химическому составу содержание основного эгиринового минала в пробах возрастает от ранних генераций минерала к поздним (от 82 до 98 %). Остальная часть химических анализов рассчитывается на миналы, которые уменьшаются по мере возрастания эгириновой компоненты: дипсидовый (от 11 % и ниже), геденбергитовый и кушироитовый (от 5 % и ниже). Максимальные содержания примесей в «альпийском» эгирине (мас. %): CaO 4.0, TiO₂ 2.7, MgO 2.0, Al₂O₃ 1.8, V₂O₅ 1.3, MnO 0.3.

Наиболее железистые разности кристаллов позднего эгирина имеют желтоватый оттенок. Эгирины, обогащенные титаном, приобретают голубовато-зелёные оттенки. Подобное изменение цвета известно для норвежских эгиринов (Raade, 2010).

Изменение кристаллографических форм наглядно проявилось на снимках кристаллов промежуточных типов в обратно отраженных электронах (рис. 9). Внутренние зоны кристаллов обогащены

Ca, Mg, Al (табл. 3). Менее отчетливо заметны осветлённые блоки, обогащённые натрием и железом. Чёткая картина наблюдается по обогащению и зональному распределению титана в поздних зонах кристаллических индивидов.

Выводы

В процессе формирования Вишневогорского щёлочно-карбонатитового комплекса изменялся химический состав и морфология кристаллов эгирина. При фенитизации, связанной с преобразованием пород под влиянием перегретых щелочных флюидов, кристаллизовались пироксены с минимально предельными содержаниями эгиринового минала (37–57 %). Огранка кристаллов характеризуется примитивным «геденбергитовым» типом – комбинацией призмы {110} с пинакоидами {001}, {010} и {100}. В ассоциации с эгирином этого типа обычно наблюдается аланит-(Ce) минерализация.

Огранка эгирина, генетически связанного с пегматитами и карбонатитами, усложняется гранями дополнительных призм с простыми индексами. Эгириновый минал в химическом составе минерала достигает 75 %. К подобным геологическим образованиям приурочены повышенные концентрации пирохлора. Для эгирина из миаскит-пегматитов характерны досковидные двойники эгирина.

Наиболее богатая огранка наблюдается у «альпийских» островершинных кристаллов пироксена с содержанием эгириновой молекулы более 80 %, выросших в гидротермальных условиях в поздние периоды становления Вишневогорского комплекса. В жилах с эгирином этого типа отмечается наибольшее минералогическое разнообразие с присутствием минералов редких земель и стронция.

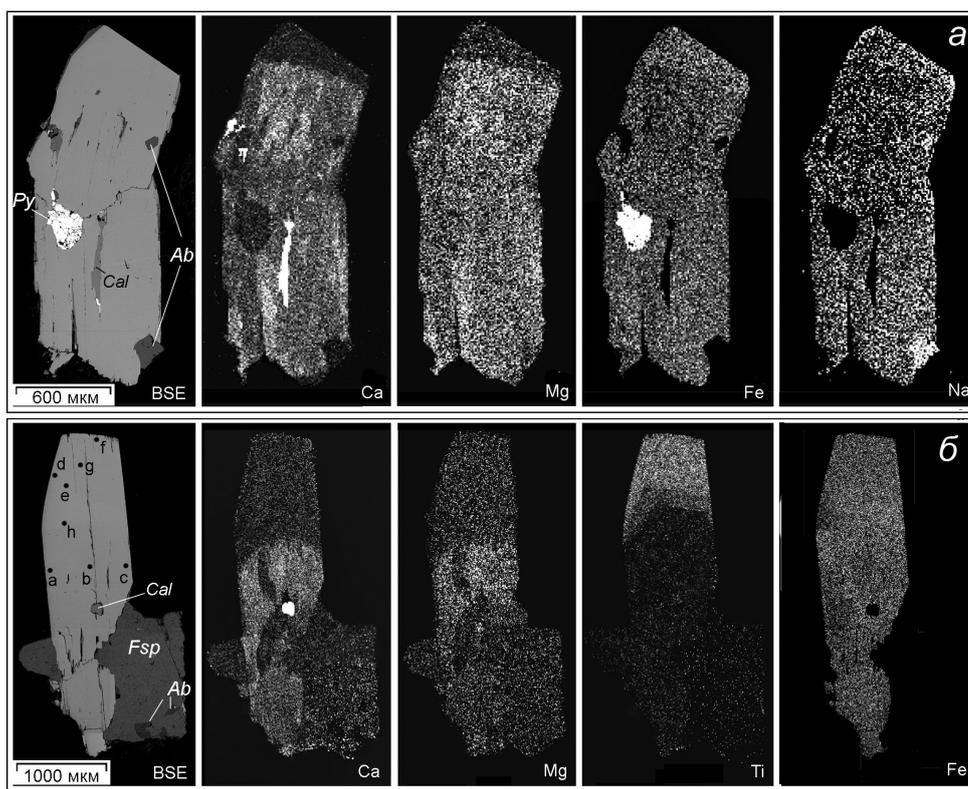


Рис. 9. Зонально-секториальное строение и фантомные включения пироксенов ранних генераций в эгирине из альпийских жил в характеристическом излучении элементов.

а – ранних генераций, б – поздних генераций. Ab – альбит, Cal – кальцит, Fsp – микроклин, Py – пирит.

Fig. 9. Zonal-sectorial structure and phantom inclusions of pyroxenes of early generations in aegirine from Alpine-type veins in characteristic radiation of elements.

a – early generations, b – late generations. Ab – albite, Cal – calcite, Fsp – potassium feldspar, Py – pyrite.

Таблица 3

Химический состав эгирина из жил альпийского типа (мас. %)

Table 3

Chemical composition of aegirine from Alpine-type veins (wt. %)

Компоненты	a	b	c	d	e	f	g	h
SiO ₂	50.43	50.6	50.82	50.81	50.15	50.74	50.54	50.61
TiO ₂	0.23	0.25	0.24	2.52	2.32	2.23	2.57	0.37
Al ₂ O ₃	0.58	0.65	0.73	0.30	0.42	0.41	0.44	0.09
Fe ₂ O ₃	33.32	32.58	33.01	32.2	32.91	33.1	32.25	35.16
MnO	–	0.05	–	–	0.11	–	–	–
MgO	0.94	0.97	0.96	0.31	0.29	0.16	0.35	0.21
CaO	1.31	2.41	1.98	0.10	0.02	–	0.09	0.19
Na ₂ O	12.62	11.86	11.99	13.33	13.23	13.27	13.38	13.18
Сумма	99.43	99.37	99.73	99.57	99.45	99.91	99.62	99.81
Расчёт на 4 катиона								
a – (Na _{0.94} Ca _{0.05}) _{0.99} (Fe ³⁺ _{0.94} Mg _{0.05} Ti _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.95} Al _{0.03} Fe ³⁺ _{0.03}) _{2.01} O ₆ ;								
b – (Na _{0.89} Ca _{0.10} Fe _{0.01}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.93} Mg _{0.06} Ti _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.96} Al _{0.03} Fe ³⁺ _{0.01}) _{2.00} O ₆ ;								
c – (Na _{0.90} Ca _{0.08} Fe _{0.01} Mg _{0.01}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.95} Mg _{0.05} Ti _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.96} Al _{0.03}) _{2.00} O ₆ ;								
d – Na _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.90} Mg _{0.02} Ti _{0.07} Fe ²⁺ _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.96} Al _{0.01} Fe ³⁺ _{0.03}) _{2.00} O ₆ ;								
e – (Na _{0.99} Mg _{0.01}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.92} Mg _{0.01} Ti _{0.07}) _{1.00} (Si _{1.94} Al _{0.02} Fe ³⁺ _{0.04}) _{2.00} O ₆ ;								
f – (Na _{0.99} Fe _{0.01}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.93} Mg _{0.01} Ti _{0.06}) _{1.00} (Si _{1.96} Al _{0.02} Fe ³⁺ _{0.03}) _{2.00} O ₆ ;								
g – Na _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.90} Mg _{0.02} Ti _{0.07}) _{1.00} (Si _{1.95} Al _{0.02} Fe ³⁺ _{0.03}) _{2.00} O ₆ ;								
h – (Na _{0.99} Ca _{0.01}) _{1.00} (Fe ³⁺ _{0.98} Mg _{0.01} Ti _{0.01}) _{1.00} (Si _{1.96} Fe ³⁺ _{0.04}) _{2.00} O ₆ .								

Примечание. Буквы а–h соответствуют точкам анализов на рис. 9б.

Note. Letters a–h correspond to the points of analyses in Fig. 9b.

Установленные зависимости между формой кристаллов эгирина, химическим составом и генетическими условиями образования позволяют использовать кристалломорфологический анализ в качестве дополнительного полевого критерия выделения генетических типов пород и связанной с ними редкоземельной и редкометалльной минерализации.

Литература

- Бонштедт-Куплетская Э.М.** (1951) Минералогия щелочных пегматитов Вишнёвых гор. М., АН СССР. 194 с.
- Доброхотова Е.С.** (1992) Пироксены щелочного комплекса Среднего Урала. *Минералы и минеральное сырьё Урала*. Екатеринбург, УрО АН СССР, 38–45.
- Еськова Е.М., Жабин А.Г., Мухитдинов Г.Н.** (1964) Минералогия и геохимия редких элементов Вишнёвых гор. М., Наука, 319 с.
- Левин В.Я., Роненсон Б.Н., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселев А.П.** (1997) Щёлочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург, Уралгеолком. 274 с.
- Попов В.А.** (2016) Синтаксия титанита, эгирина и экерманнита в щелочных сиенитовых пегматитах Вишнёвых гор (Южный Урал). *Минералогия*, 2(2), 3–9.
- Роненсон Б.М.** (1966) Происхождение миаскитов и связь с ними редкометалльного оруденения. М., Недра, 173 с.
- Чесноков Б.В.** (1963) Жилы альпийского типа в щелочных породах Вишнёвых гор. *Тр. Свердловского горн. инст.*, 42, 143–151.
- Morimoto N.** (1989) Nomenclature of Pyroxenes. *Canadian Mineralogist*, 27, 143–156.
- Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Aoki K., Gottardi G.** (1988) Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, 73, 1123–1133.
- Raade G.** (2010) Chemical composition of acmite/aegirine intergrowths from Rundemyr. *Eiker Norsk Bergverksmuseum Skrift*, 43, 29–34.

References

- Bonshtedt-Kupletskaya E.M.** (1951) [Mineralogy of alkali pegmatites of the Vishnevye Mountains]. M., AN SSSR, 175 p. (in Russian)
- Dobrokhotova E.S.** (1992) [Pyroxenes of the alkaline complex of the Central Urals]. *Mineraly i mineral'noe syr'e Urala [Minerals and Mineral Raw Materials of the Urals]*. Yekaterinburg, UrO AN SSSR. 38–45. (in Russian)
- Es'kova E.M., Zhabin A.G., Mukhitdinov G.N.** (1964) [Mineralogy and geochemistry of rare elements of the Vishnevye Mountains]. Moscow, Nedra, 319 p. (in Russian)
- Levin V.Ya., Ronenson B.N., Samkov S.V., Levina I.A., Sergeev N.S., Kiselev A.P.** (1997) [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Yekaterinburg: Uralgeolkom, 274 p. (in Russian)
- Popov V.A.** (2016) [Syntaxy of titanite, aegirine and eckermannite in alkali syenite pegmatites of the Vishnevye Mountains (South Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, 2(2), 3–9. (in Russian)
- Ronenson B.M.** (1966) [Origin of miaskites and related rare metal mineralization]. Moscow, Nedra, 173 p. (in Russian)
- Chesnokov B.V.** (1963) [Alpine type veins in alkaline rocks of the Vishnevye Mountains]. *Trudy Sverdlovskogo gornogo instituta [Proceedings of Sverdlovsk Mining Institute]*, 42, 143–151. (in Russian)
- Morimoto N.** (1989) Nomenclature of Pyroxenes. *Canadian Mineralogist*, 27, 143–156.
- Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Aoki K., Gottardi G.** (1988) Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, 73, 1123–1133.
- Raade G.** (2010) Chemical composition of acmite/aegirine intergrowths from Rundemyr. *Eiker Norsk Bergverksmuseum Skrift*, 43, 29–34.

Поступила в редакцию 19 марта 2018 г.