

УДК 522.33+549.643

АМФИБОЛЫ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД ИЛЬМЕНОГОРСКОГО МАССИВА И ВМЕЩАЮЩИХ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД, ЮЖНЫЙ УРАЛ

Е.П. Макагонов, В.А. Котляров, Е.В. Кориневский

Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; mak@mineralogy.ru

AMPHIBOLES OF ALKALINE ROCKS OF THE ILMENOGORSKY COMPLEX AND COUNTRY METAMORPHIC ROCKS, SOUTH URALS

E.P. Makagonov, V.A. Kotlyarov, E.V. Korinevsky

Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; mak@mineralogy.ru

Исследованы амфиболы из пород Ильменогорского миаскитового массива и метаморфических пород его кровли по разрезу структурной скважины С-2000, вскрывшей 400 м фенитизированных пород кровли и 1600 м внутренних частей массива. Приведены составы и распределение в породах геологического разреза двадцати минеральных видов амфиболов из рядов горнблендита, эденита, чермакита, катопфорита, куммингтонита, тремолита, рихтерита–ферривинчита, гастингсита и тарамита. На примере изменения состава амфиболов показано, что фенитизация вмещающих пород проходила во время становления миаскитового массива. В амфиболах из пород в последовательности гнейс+амфиболит–фенит+сиенит–сандыит–миаскит увеличивается содержание Na, Fe, K и уменьшается содержание Ca, Mg. В последующем весь комплекс магматических и метаморфических пород подвергся динамотермальному метаморфизму. Образование амфиболсодержащих пород характеризуются следующими термодинамическими параметрами: амфиболиты $P = 5\text{--}6$ кбар, $T = 600\text{--}660$ °С; гнейсы $P = 3.5\text{--}4.8$ кбар, $T = 605$ °С; миаскиты $P = 8\text{--}9$ кбар, $T = 600\text{--}700$ °С; изменённые миаскиты и фениты $P = 4.5\text{--}6.5$ кбар, $T = 600$ °С. Высокие термодинамические параметры миаскитов связаны с нахождением в ядре факолитообразной структуры.

Илл. 8. Табл. 8. Библ. 31.

Ключевые слова: амфиболы, амфиболит, миаскит, фенит, Ильменогорский миаскитовый массив, Южный Урал.

Amphiboles of the Ilmenogorsky miaskite complex and metamorphic rocks of its top are studied along the section of structural borehole C-2000, which drilled 400 m of fenitized rocks of the top and 1600 m of internal parts of the complex. The composition and distribution of 20 species of amphiboles of the hornblendite, edenite, tschermakite, katophorite, cummingtonite, tremolite, richterite-ferri-winchite, hastingsite and taramite mineral groups are presented. It is shown on example of variable composition of amphiboles that the country rocks were fenitized during the formation of the miaskite complex. Amphiboles of rocks of the gneiss+amphibolite–fenite+syenite–sandyite–miaskite sequence exhibit the increasing Na, Fe, and K contents and decreasing Ca and Mg contents. Later the entire complex of igneous and metamorphic rocks underwent dynamothermal metamorphism. The formation of amphibole-bearing rocks are characterized by following thermodynamic parameters: amphibolites $P = 5\text{--}6$ kbar; $T = 600\text{--}660$ °C; gneiss $P = 3.5\text{--}4.8$ kbar, $T = 605$ °C; miaskites $P = 8\text{--}9$ kbar, $T = 600\text{--}700$ °C; altered miaskites and fenites $P = 4.5\text{--}6.5$ kbar, $T = 600$ °C. The high thermodynamic parameters of miaskites are related to the presence of phacolite structure in the core of the complex.

Figures 8. Tables 8. References 31.

Key words: amphiboles, miaskite, fenites, Ilmenogorsky miaskite complex, South Urals.

Введение

Минералы надгруппы амфиболов одни из самых распространённых минералов Ильмен; они входят в состав горных пород Ильменогорского миаскитового массива, метаморфитов его кровли, метасоматитов и гидротермалитов. Ранее исследование минералов этой надгруппы производилось с поверхности территории в отдельных разрозненных точках Ильмен. Общие сведения по систематике ильменских амфиболов, которая основывалась на классификации IMA 1997 г. с оригинальными авторскими дополнениями, суммированы в работах (Никандров и др., 2000; Вализер и др., 2004).

Для сравнительного анализа влияния щелочных процессов на составы амфиболов нами был отобран материал из керна структурной скважины С-2000, заложенной в 2 км от южного окончания поверхностной границы миаскитового массива и вскрывшей 400 м фенитизированных пород кровли и 1600 м внутренних частей массива. Это наиболее глубокий и представительный геологический разрез Ильменогорского массива. Ранее из породообразующих минералов по данному разрезу были проанализированы полевые шпаты и биотиты (Макагонов, 1999; Макагонов, Миронов, 2005). В настоящей работе названия амфиболов даны в соответствии с последней классификацией IMA (Hawthorne et al., 2012).

Методы исследования

Состав минералов изучался на растровом электронном микроскопе РЭММА-202М с энергодисперсионной приставкой LZ-5 при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда $3 \cdot 10^{-3}$ А (диаметр зонда ~ 5 мкм), аналитик В.А. Котляров. При проведении количественного анализа использовались стандарты чистых металлов (MICRO-ANALYSIS CONSULTANTWS LT, LTD, X-RAY MICROPROBE STANDARDS, REGISTERED STSNDARD NUMBER 1362; корунд и Y_2O_3) и стандарты синтетических (или природных) минералов (ASTIMEX SCIENTIFIC LIMITED, MINM 25-53, Mineral Mount Serial N0:01-044).

Амфиболсодержащие породы Ильменогорского массива и его кровли

Строение Ильменогорского массива и его окружения, петрографический состав по поверх-

ности и для глубоких частей массива приведены в ряде монографий (Левин, 1974; Левин и др., 1997; Макагонов и др., 2003). Ильменогорский массив имеет факолитобразную форму, конформную с вмещающими породами (рис. 1). В составе пород кровли (ильменогорской и вишнёвогорской толщ) наблюдается широкий спектр метаморфических пород: переслаивающиеся гнейсы, амфиболиты, кварцито-гнейсы, пироксен-скаполит-плагиоклазовые породы, кварциты, плагиосланцы. В верхней части разреза широко развиты межслоевые гнейсовидные плагиограниты. Кроме того, наблюдаются мелкие тела метагипербазитов (Левин, 1974; Макагонов и др., 2003). Зона экзоконтакта массива представляет собой переслаивание фенитизированных гнейсов и амфиболитов с сиенитами и миаскитами. Амфиболсодержащие породы составляют 30 % пород кровли, вскрытой скважиной С-2000. Содержание амфиболов в метаморфических породах варьирует от единичных зёрен в кварцито-гнейсах до 60 об. % в амфиболитах и до 75 об. % в куммингтонитсодержащих сланцах. В зонах, секущих метагипербазиты, отмечаются практически мономинеральные тремолитовые агрегаты.

На обнажённой части Ильменогорского массива выходы миаскитов составляют 56 %, из которых на амфиболсодержащие миаскиты приходится 18 % (Левин, 1974). Полосы амфиболовых миаскитов залегают среди биотитовых миаскитов, располагаясь субпараллельно границам массива в его эндоконтактной зоне. Часть полос амфиболовых миаскитов наблюдается на повышенных участках рельефа в центральной части массива. На 24 % площади массива распространены сиениты. На амфиболовые разности сиенитов приходится 10 %. Северную и северо-восточную части массива занимает зона перемежаемости пёстрых по составу полос миаскитов, сиенитов, фенитов (20 % площади массива).

Среди амфиболовых миаскитов встречаются линзовидные тела меланократовых амфиболовых пород с местным названием «сандыиты», в которых содержание амфибола составляет 30–60 %. Остальная часть приходится на пироксен, кали-натриевый полевой шпат, нефелин, плагиоклаз (Левин, 1974). Спорадически встречаются полосы фирситов – амфиболовых миаскитов и сиенитов с гранатом. В разрезе Ильменогорского массива скважины С-2000 амфиболсодержащие миаскиты составляют 15 %. Половина из них распределена в виде слоёв мощностью 1–22 м в интервале 0–500 м от кровли

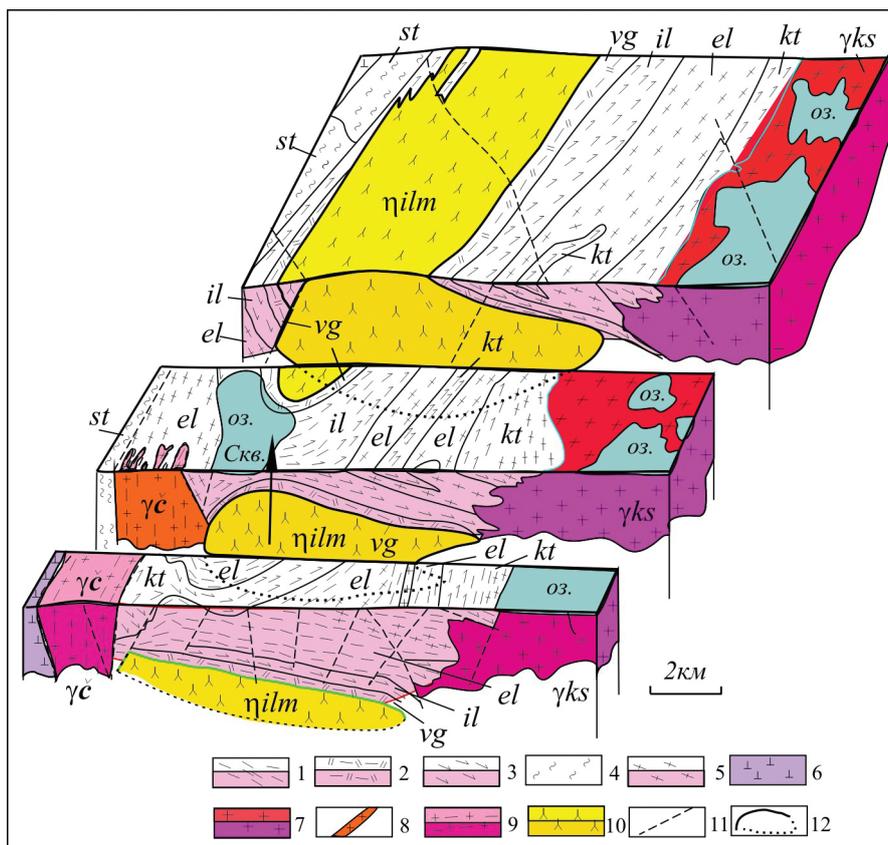


Рис. 1. Блок-диаграмма Ильменогорского миаскитового массива (Макагонов и др., 2003 г.).

1 – гнейсы, 2 – кварциты и кварцито-гнейсы, 3 – амфиболиты, 4 – сланцы, 5 – мигматиты, 6 – серпентиниты, 7 – граниты, 8 – дайки гранитов, 9 – гнейсо-граниты, 10 – миаскиты, 11 – разломы, 12 – геологические границы. Толщи пород: *vg* – вишневогорская, *il* – ильменогорская, *el* – еланчиковская, *kt* – кыштымская, *st* – сайтовская. Массивы: *ηilm* – Ильменогорский, *γc* – Чашковский, *γks* – Кисегачский.

Fig. 1. Block diagram of the Ilmenogorsky miaskite complex, (Makagonov et al., 2003).

1 – gneisses, 2 – quartzites, quartzite gneisses, 3 – amphibolites, 4 – schists, 5 – migmatites, 6 – serpentinites, 7 – granites, 8 – dikes of granites, 9 – gneiss granites, 10 – miaskites, 11 – faults, 12 – geological boundaries. The sequences of rocks: *vg* – Vishnevogorsk, *il* – Ilmenogorsk, *el* – Elanchik, *kt* – Kyshtym, *st* – Saitovo. Complexes: *ηilm* – Ilmenogorsky, *γc* – Chashkovsky, *γks* – Kisegach.

массива. Вторая половина распределена по остальной части разреза (Макагонов и др., 2003). Между биотитовыми и амфиболсодержащими миаскитами наблюдаются, в основном, постепенные переходы. Часть сандыитов залегает в виде отдельных тел с резкими границами. Кроме того, отмечаются разорванные и будинированные тела этих пород (рис. 2а).

Предполагая магматический генезис и согласно Петрографическому кодексу (2008) по химическому составу в ряду мезо-меланократовых щелочных пород формально можно выделить следующие виды: рихсдоррит, сэрнаит–тешенит, малиньит, полевошпатовый уртит, мельтейгит–ийолиит, уртит (конгрессит). На диаграмме ($K_2O + Na_2O$) – SiO_2 их составы располагаются в поле с SiO_2 менее 53 мас. % (рис. 3).

По текстурно-структурным характеристикам ильменские породы отличаются от классических представителей. В основном, их текстуры и структуры типичны для гнейсов – от пятнисто-очковых до пунктирно-полосчатых, подобных вмещающим метаморфитам и фенитам (рис. 4б, в). В.И. Левиным (1974) отмечено, что по текстурно-структурным особенностям сандыиты подобны амфиболитам. В массиве и во вмещающих породах совпадают складчатость, гнейсовидность и линейность. В редких случаях в миаскитах наблюдается реликтовая относительно слабо изменённая фойяитовая текстура с характерными продольными сечениями призматических индивидов нефелина (см. рис. 4а).

В классических щелочно-ультраосновных и щелочно-основных породах из фемических мине-

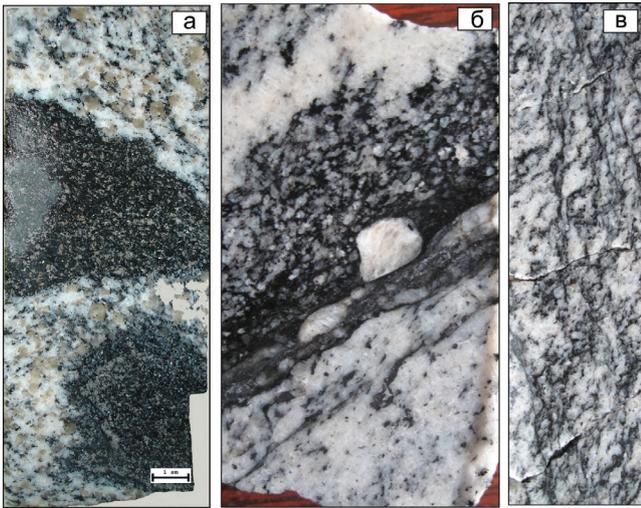


Рис. 2. Деформационные текстуры в породах Ильменогорского массива.

а – будинированные сандыиты (глубина 1611.2 м); б – бластомилонит с «закатанными» обломками полевого шпата (глубина 1628.2 м); в – линзовидно-очковая текстура, обусловленная сетью тонких бластомилонитовых полос (глубина 1395.6 м). Керн скважины С-2000, диаметр керна – 4 см.

Fig. 2. Deformation textures of rocks of the Ilmenogorsky complex.

а – boudinated sandyites (1611.2 m); б – blastomylonite with «rounded» fragments of feldspar (1628.2 m); в – lens-augen texture caused by a network of thin blastomylonitic stripes (depth 1395.6 m). Core samples from С-2000 borehole, core diameter is 4 cm.

ралов преобладает клинопироксен, а в ильменогорских породах – амфиболы. Диаграмма составов пород скважины С-2000 в координатах (Na₂O + K₂O) и SiO₂ имеет вид треугольника с метаморфитами в основании и вершиной в миаскитах в точке 17 мас. % (Na₂O + K₂O) и 55 мас. % SiO₂ (см. рис. 3а). Подобное распределение характерно и для Al₂O₃. Количество оксидов железа в породах массива и его кровли связано с их меланократовостью, но при относительном равенстве меланократовости щелочные породы Ильменогорского массива менее кремнистые, чем метаморфиты (см. рис. 3в). Такая же картина распределения СаО и MgO в зависимости от содержания SiO₂. Химические составы фенитов располагаются между миаскитами и гнейсами в полях сиенитов и монцонитов (см. рис. 3).

Амфиболовые агрегаты наблюдаются также в оливин-энстатитовых породах в виде секущих полос и цемента тектонических брекчий с признаками замещения первичных минералов (Макагонов и др., 2003). Все породы рассматриваемой территории рассечены узкими крутопадающими полосами

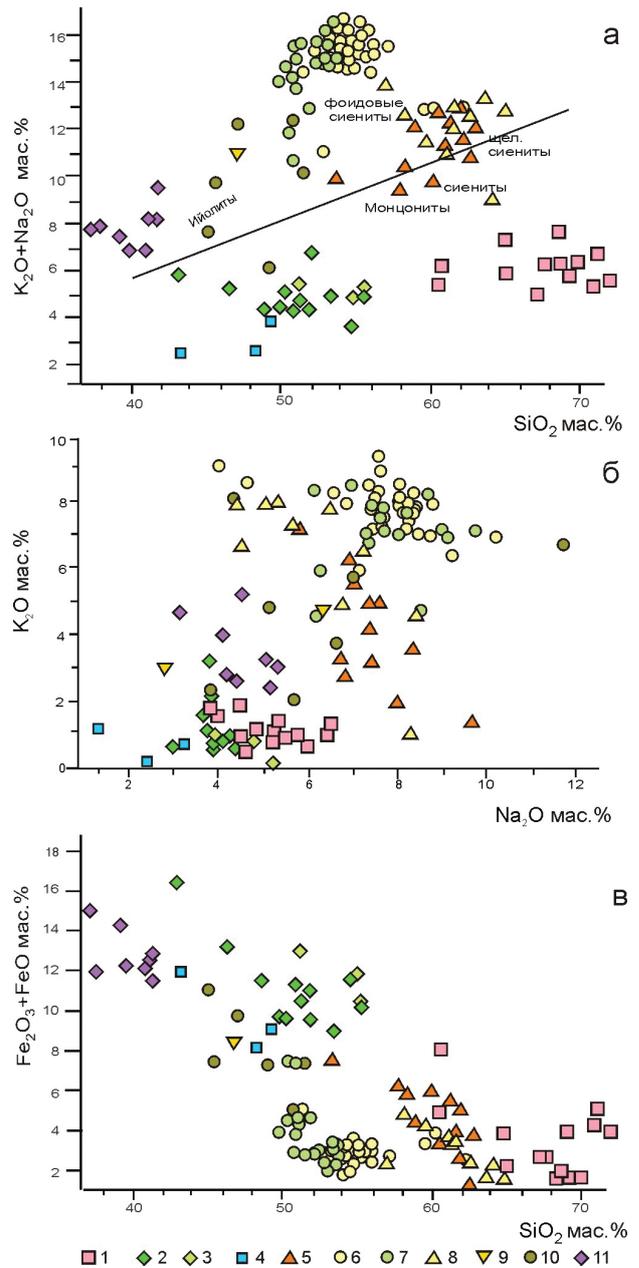


Рис. 3. Соотношения петрогенных компонентов в породах Ильменогорского массива и его кровли (скважина С-2000).

1 – гнейс; 2 – амфиболит; 3 – амфиболит с куммингтонитом; 4 – пироксен-скаполит-плагиоклазовая порода; 5 – фенит; 6 – миаскит; 7 – малиньит; 8 – сиенит; 9 – сэрнаит; 10 – сандыит (малиньит); 11 – мельтейгит.

Fig. 3. Correlations between major oxides of rocks of the Ilmenogorsky complex and its top (borehole C-2000).

1 – gneiss; 2 – amphibolite; 3 – amphibolite with cummingtonite; 4 – pyroxene-scapolite-plagioclase rock; 5 – fenite; 6 – miaskite; 7 – malignite; 8 – syenite; 9 – saerनाite; 10 – sandyite (malignite); 11 – melteigite.

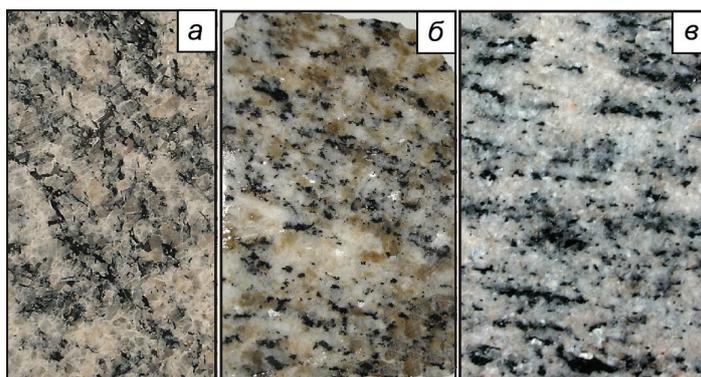


Рис. 4. Текстуры миаскитов: а – реликтовая фойяитовая текстура миаскита; б, в – текстуры разгнейсованных миаскитов: пятнисто-очковая (б) и пунктирно-полосчатая (в). Ильменогорский массив, керн скважины С-2000. Ширина фото 4 см.

Fig. 4. Structures of miaskites: а – relic foyaitite structure of miaskite; б, в – structures of gneissic miaskites: spotty-augene (б) and dotted-banded (в). Ilmenogorsky complex, core sample of С-2000 well. The photo width is 4 cm.

ми blastsмилонитов преимущественно субмеридионального простирания. В blastsмилонитах, развитых по силикатным породам, на фоне тёмной перетёртой тонкозернистой массы часто наблюдаются обломки горных пород и отдельных кристаллов (см. рис. 2б). Нередко в породах отмечаются линзовидные и очково-линзовидные текстуры, обусловленные системой тонких милонитовых полосок (см. рис. 2в).

Видовой состав амфиболов в керне структурной скважины С-2000

В керне структурной скважины С-2000 обнаружено 20 минеральных видов из надгруппы амфиболов.

Ряд горнблендита. Амфиболы ряда горнблендитов приурочены, в основном, к амфиболитам. Среди минеральных видов этого ряда наиболее распространён магнезиоферригорнблендит. Его средний химический состав приведен в табл. 1 (ан. 2). Для минерала характерно повышенное содержание Si (0.59–7.40 к.а.ф.) и редкая примесь К – до 0.04 к.а.ф. Количество Na находится в пределах 0.10–0.42 к.а.ф.

Реже в амфиболитах отмечается магнезиогорнблендит. Минерал отнесён к этому виду с учётом количества Al в кристаллохимической позиции В (> 0.5 к.а.ф.). По сравнению с магнезиоферригорнблендитом, в этом амфиболе меньше Si, Fe и Ca (см. табл. 1, ан. 1).

В гнейсах отмечается наиболее железистая разновидность амфиболов ряда горнблендитов – ферроферригорнблендит. Для него характерно минимальное содержание Si, повышенное содержание К и Ti (см. табл. 1, ан. 3).

Ряд эденита. Собственно эденит распространён в амфиболитах, гнейсах и метагипербазитах. Эденит из амфиболитов содержит в среднем больше Na, Ti и Mn, чем эденит из гнейсов (см. табл. 1, ан. 5 и 6). В анализе амфибола ряда эденитов из плагиосланцев сумма элементов в кристаллохимической позиции А минимальна (0.51 к.а.ф.). В эдените из гнейсов отмечается повышенное количество К и Fe (см. табл. 1, ан. 5).

В фенитах и сиенитах эдениты сменяются ферриэденитом. Этот минерал содержит минимальное количество кремния и по составу близок к ферроферритарамиту. Параллельно с ростом содержания Fe в ферриэдените увеличивается содержание Na, К, Ti и Mn (см. табл. 1, ан. 8). Эденит из метагипербазитов резко отличается от эденита из метаморфитов близким к предельным содержаниям Si и Mg и малым количеством Fe и К (см. табл. 1, ан. 7).

Совместно с эденитами в фенитовом ореоле обнаружен калийсодержащий ферроферрикатафорит (см. табл. 1, ан. 9). Для него характерно повышенное содержание Ti и Mn.

Ряд чермакита. Из амфиболов ряда чермакитов наиболее типичный для амфиболитов ферричермакит. Для минерала характерно высокое содержание суммы щелочей, часто превышающее 0.5 к.а.ф. При дефиците Ca натрий существенно дополняет кристаллохимическую позицию В, поэтому в формульной позиции А сумма щелочей не превышает 0.5 к.а.ф. при преобладании в составе этой позиции К (табл. 2, ан. 1). Отношение К/Na = 0.61. В куммингтонитсодержащих амфиболитах содержание суммы щелочей в ферричермаките достигает 0.9 к.а.ф. за счёт резкого увеличения со-

Таблица 1

Химический состав магнезиогорнблендита (1), магнезиоферригорнблендита (2), ферроферригорнблендита (3), калийэденита (4); эденита (5–7), ферроэденита (8) и ферроферрикатофорита (9) Ильменогорского блока (мас. %)

Table 1

Chemical composition of magnesio-hornblende (1), magnesio-ferrihornblende (2), magnesio-ferroferri-hornblende (3) potassic-edenite (4), edenite (5–7), ferro-edenite (8) and ferro-ferri-katophorite (9) of the Ilmenogorsky complex (wt. %)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	46.77	49.85	43.02	43.73	44.80	44.92	58.16	42.57	42.52
TiO ₂	0.49	0.11	0.74	1.11	0.38	0.76	0.04	0.48	1.00
Al ₂ O ₃	11.63	5.80	9.13	8.65	8.01	9.47	0.47	9.29	9.45
FeO	13.83	15.26	24.92	19.52	17.85	16.52	1.07	23.03	24.35
MnO	0.32	0.40	0.46	0.23	0.13	0.39	0.06	1.37	1.45
MgO	12.28	13.39	6.91	10.31	12.30	11.03	24.02	7.08	5.98
CaO	10.67	12.19	10.79	12.58	12.12	12.13	11.21	10.23	7.00
Na ₂ O	2.09	0.76	1.06	0.83	1.43	1.96	2.06	2.65	4.65
K ₂ O	0.24	0.47	1.25	1.30	1.36	0.92	0.67	1.66	1.98
H ₂ O*	2.10	2.07	1.98	2.00	2.03	2.01	2.19	1.96	1.96
Сумма	100.42	100.30	100.26	100.26	100.41	100.11	100.39	100.32	100.34
n	1	6	1	1	3	6	2	3	1

Расчёт на 13 катионов

1 – (Na _{0.21} K _{0.04}) _{Σ0.25} (Ca _{1.63} Na _{0.37}) _{Σ2.00} (Mg _{2.62} Fe ²⁺ _{0.97} Fe ³⁺ _{0.68} Al _{0.64} Ti _{0.05} Mn _{0.04}) _{Σ5.00} (Si _{6.68} Al _{1.32}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ;
2 – (Na _{0.10} K _{0.09}) _{Σ0.19} (Ca _{1.89} Na _{0.11}) _{Σ2.00} (Mg _{2.89} Fe ²⁺ _{1.37} Fe ³⁺ _{0.48} Al _{0.20} Mn _{0.05} Ti _{0.01}) _{Σ5.00} (Si _{7.21} Al _{0.79}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ;
3 – (K _{0.24} Na _{0.06}) _{Σ0.30} (Ca _{1.75} Na _{0.25}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{2.03} Mg _{1.56} Fe ³⁺ _{1.12} Al _{0.14} Ti _{0.09} Mn _{0.06}) _{Σ5.00} (Si _{6.51} Al _{1.49}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ;
4 – (K _{0.25} Na _{0.24} Ca _{0.02}) _{Σ0.51} Ca _{2.00} (Mg _{2.30} Fe ²⁺ _{1.89} Fe ³⁺ _{0.56} Ti _{0.13} Al _{0.09} Mn _{0.03}) _{Σ5.00} (Si _{6.56} Al _{1.44}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ;
5 – (Na _{0.33} K _{0.26}) _{Σ0.59} (Ca _{1.92} Na _{0.08}) _{Σ2.00} (Mg _{2.71} Fe ²⁺ _{1.45} Fe ³⁺ _{0.76} Ti _{0.04} Al _{0.02} Mn _{0.02}) _{Σ5.00} (Si _{6.63} Al _{1.37}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ;
6 – (Na _{0.50} K _{0.18}) _{Σ0.68} (Ca _{1.94} Na _{0.06}) _{Σ2.00} (Mg _{2.45} Fe ²⁺ _{1.89} Al _{0.36} Fe ³⁺ _{0.17} Ti _{0.08} Mn _{0.05}) _{Σ5.00} (Si _{6.69} Al _{1.31}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ;
7 – (Na _{0.53} K _{0.02}) _{Σ0.55} (Ca _{1.58} Na _{0.42}) _{Σ2.00} (Mg _{4.52} Fe ³⁺ _{0.37} Al _{0.10} Cr _{0.01}) _{Σ4.99} (Si _{7.36} Al _{0.64}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) ₂ ;
8 – (Na _{0.47} K _{0.32}) _{Σ0.79} (Ca _{1.68} Na _{0.32}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{2.25} Mg _{1.62} Fe ³⁺ _{0.70} Mn _{0.18} Ti _{0.05} Al _{0.20}) _{Σ5.00} (Si _{6.52} Al _{1.48}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ;
9 – (Na _{0.53} K _{0.39}) _{Σ0.92} (Ca _{1.15} Na _{0.85}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{2.14} Mg _{1.36} Fe ³⁺ _{0.98} Mn _{0.19} Ti _{0.12} Al _{0.21}) _{Σ5.00} (Si _{6.51} Al _{1.49}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} .

Примечание. Здесь и далее: H₂O* – расчёт; n – число анализов. В ан. 7 – 0.12 мас. % Cr₂O₃. Вмещающие породы: 1, 2, 6 – амфиболит; 3, 5 – гнейс; 4 – плагиосланец; 7 – метагипербазит; 8, 9 – фенит.

Note. Here and hereafter H₂O* – recalculated; n – number of analyses. An. 7 – 0.12 wt. % Cr₂O₃. Country rocks: 1, 2, 6 – amphibolite; 3, 5 – gneiss; 4 – plagiogschist; 7 – metaultramafic rock; 8, 9 – fenite.

держания Na при уменьшении содержания Ca и K (K/Na = 0.19). В среднем увеличивается окисленность Fe и содержание Mn (см. табл. 2, ан. 2).

Для амфиболсодержащих гнейсов из описываемого ряда амфиболов характерен ферроферричермакит (см. табл. 2, ан. 4). Сумма щелочей в этом минерале практически равна сумме щелочей в ферричермаките из амфиболитов, но отношение K/Na существенно выше (в среднем равно 0.87). В фенитовом ореоле отмечаются ферроферричермакит и ферричермакит (см. табл. 2, ан. 3, 5). По сравнению с аналогами, наблюдаемыми в метаморфических породах, в составе половины амфиболов из фенитов содержание K преобладает над содержанием Na. Общее содержание щелочей близко к содержанию в ферроферричермаките из гнейсов.

Внутри миаскитового массива на глубине 1637.6 м в фенитоподобной породе, близкой по химическо-

му составу к сэрнаиту, обнаружен ферроферричермакит с суммой щелочей, равной 1.07 к.а.ф. при K/Na = 0.54. Минерал отличается от выше описанных ферроферричермакитов повышенным количеством Ti, Mn и Fe³⁺. Среди минералов ряда чермакитов у него наиболее низкое содержание кремнезёма (см. табл. 2, ан. 6).

Ряд куммингтонита. Куммингтонит и грюнерит замещают ферричермакит в амфиболитах, а также входят в состав псевдоморфоз по зёрнам граната совместно с биотитом, альбитом и магнетитом. Замещение происходит по трещинам отдельности вплоть до образования полных псевдоморфоз. Эти минералы наблюдаются также в плагиосланцах. В значительной части анализов ксеноморфного куммингтонита отмечается дефицит Si. Анализы с максимальным содержанием Si приведены в табл. 3 (ан. 1 и 2). Количество Mg и Fe

Таблица 2

Химический состав ферричермакита (1–3), ферроферричермакита (4) и калиферроферричермакита (5–6) Ильменогорского блока (мас. %)

Table 2

Chemical composition of ferri-tschermakite (1–3), ferro-ferri-tschermakite (4) and potassic-ferro-ferri-tschermakite (5–6) of the Ilmenogorsky complex (wt. %)

Компоненты	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	43.10	42.95	42.11	41.72	42.13	38.83
TiO ₂	0.90	0.83	0.66	0.69	0.62	1.29
Al ₂ O ₃	10.90	12.08	9.21	9.51	8.69	13.14
FeO	18.60	19.06	24.40	25.55	25.03	26.42
MnO	0.20	0.36	0.42	0.49	0.16	1.09
MgO	10.50	10.15	8.00	6.78	7.84	4.78
CaO	11.50	10.31	10.88	10.85	11.10	8.65
Na ₂ O	1.20	1.98	1.10	1.05	1.02	2.34
K ₂ O	1.10	0.58	1.54	1.40	1.54	1.93
H ₂ O	2.03	2.06	1.99	1.97	1.97	1.97
Сумма	100.03	100.36	100.31	100.01	100.10	100.44
n	9	10	2	4	2	1
Расчёт на 13 катионов						
1 – (K _{0.22} Na _{0.17}) _{Σ0.39} (Ca _{1.82} Na _{0.18}) _{Σ2.00} (Mg _{2.32} Fe ²⁺ _{1.32} Fe ³⁺ _{0.97} Al _{0.26} Ti _{0.10} Mn _{0.03}) _{Σ5.00} (Si _{6.36} Al _{1.64}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
2 – (Na _{0.17} K _{0.11}) _{Σ0.28} (Ca _{1.61} Na _{0.39}) _{Σ2.00} (Mg _{2.20} Fe ³⁺ _{1.33} Fe ²⁺ _{0.99} Al _{0.34} Ti _{0.09} Mn _{0.05}) _{Σ5.00} (Si _{6.26} Al _{1.74}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
3 – (K _{0.30} Na _{0.08}) _{Σ0.38} (Ca _{1.76} Na _{0.24}) _{Σ2.00} (Mg _{1.80} Fe ²⁺ _{1.71} Fe ³⁺ _{1.37} Ti _{0.07} Mn _{0.05}) _{Σ5.00} (Si _{6.35} Al _{1.64} Ti _{0.01}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
4 – (K _{0.27} Na _{0.08}) _{Σ0.35} (Ca _{1.77} Na _{0.23}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{1.96} Mg _{1.54} Fe ³⁺ _{1.30} Ti _{0.08} Al _{0.06} Mn _{0.06}) _{Σ5.00} (Si _{6.36} Al _{1.64}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
5 – (K _{0.30} Na _{0.11}) _{Σ0.41} (Ca _{1.81} Na _{0.19}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{1.89} Mg _{1.77} Fe ³⁺ _{1.29} Ti _{0.03} Mn _{0.02}) _{Σ5.00} (Si _{6.4} Al _{1.56} Ti _{0.04}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
6 – (K _{0.37} Na _{0.10}) _{Σ0.47} (Ca _{1.41} Na _{0.59}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{1.72} Fe ³⁺ _{1.64} Mg _{1.08} Al _{0.27} Ti _{0.15} Mn _{0.14}) _{Σ5.00} (Si _{5.91} Al _{2.09}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) ₂ .						

Примечание. Вмещающие породы: 1–2 – амфиболит; 3, 5 – фенит; 4 – гнейс; 6 – миаскит.

Note. Country rocks: 1–2 – amphibolite; 3, 5 – fenite; 4 – gneiss; 6 – miaskite.

колеблется вблизи паритетных значений, чаще отклоняясь в сторону Mg. Сумма Mg + Fe составляет 5.68–6.73 к.а.ф. Дефицит элементов восполняется Ca и Na. Обычно содержатся примеси Mn, Ti и K.

Ряд тремолита. Длиннопризматические зёрна тремолита совместно с флогопитом и хлоритом развиваются в энстатит-оливиновой породе. В тремолите из метагипербазитов отмечаются предельно низкие содержания Si и высокие содержания Mg (см. табл. 3, ан. 4). Отмечается существенная примесь Na и K. В амфиболитах наблюдается более железистая разновидность актинолита с отношением Fe/(Fe+Mg) = 0.38, приближающимся к ферроактинолиту (см. табл. 3, ан. 3). Это один из самых поздних амфиболов: его тонкодрозовые нарастания наблюдаются на сколах разорванных индивидов куммингтонизированных амфиболов. По сравнению с тремолитом из гипербазитов он содержит больше примесей Al и Mn, меньше Si, Na и K.

Ряд рихтерита–ферривинчита. Рихтерит и ферривинчит совместно входят в состав метагипербазитов и по химическому составу отличаются

незначительно (см. табл. 3, ан. 5–6). В этих амфиболах содержание Si близко к нижнему пределу. В рихтерите содержания Ca и Na выше, чем в ферривинчите на 0.11 и 0.09 к.а.ф., соответственно. Этого количества оказалось достаточно, чтобы немного превысить пороговое значение в 0.5 к.а.ф. для кристаллохимической позиции А и, соответственно, отделить его от ферривинчита. Морфологически эти амфиболы не отличаются.

Ряд гастингсита. Амфиболы этого ряда (магнезиогастингсит, гастингсит и калийгастингсит) встречаются практически во всех амфиболсодержащих породах разреза по скважине С-2000, но для миаскитов характерен магнезиогастингсит, а для сиенитов и скаполитизированных пироксен-плагиоклаз-амфиболовых пород – гастингсит. По химическому составу магнезиогастингсит из гнейсов наиболее кремнистый (табл. 4, ан. 1). В нём при резком увеличении содержания Fe (в среднем, от 2.36 до 3.21 к.а.ф.) уменьшается количество Si, Mg и Ca (см. табл. 4, ан. 5). Повышены содержания Ti и Mn. Содержание щелочей в ан. 1 и 5 практически

Таблица 3

Химический состав куммингтонита (1), грюнерита (2), тремолита (3–4), рихтерита (5) и ферривинчита (6) Ильменогорского блока (мас. %)

Table 3

Chemical composition of cummingtonite (1), grunerite (2), tremolite (3–4), richterite (5) and ferri-winchite (6) of the Ilmenogorsky complex (wt. %)

Компоненты	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	52.88	48.40	52.05	58.16	56.25	56.38
TiO ₂	0.10	0.33	–	0.04	–	–
Al ₂ O ₃	2.35	5.63	2.93	0.47	2.14	2.14
FeO	23.85	25.98	15.45	1.07	2.39	2.61
MnO	0.43	0.28	0.86	0.06	0.01	0.05
MgO	17.67	13.80	14.07	24.02	23.69	23.60
CaO	0.71	2.61	11.26	11.21	9.49	8.72
Na ₂ O	0.12	1.65	1.57	2.06	3.91	4.07
K ₂ O	0.13	0.09	0.30	0.67	0.45	0.61
Cr ₂ O ₃	–	–	–	–	0.30	0.04
H ₂ O	2.07	2.08	2.08	2.20	2.22	2.22
Сумма	100.31	100.85	100.57	99.96	100.85	100.44
n	2	2	1	4	1	1
Расчёт: ан. 1, 2 – на 15 катионов, ан. 3–6 – на 13 катионов						
1 – (Mg _{1.83} Ca _{0.11} Na _{0.03} K _{0.03}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{2.59} Mg _{1.98} Fe ³⁺ _{0.31} Mn _{0.05} Al _{0.06} Ti _{0.01}) _{Σ5.00} (Si _{7.66} Al _{0.34}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
2 – (Mg _{1.14} Na _{0.46} Ca _{0.40} K _{0.02}) _{Σ2.02} (Mg _{1.83} Fe ²⁺ _{1.66} Fe ³⁺ _{1.48} Mn _{0.03}) _{Σ5.00} (Si _{6.99} Al _{0.96} Ti _{0.04}) _{Σ7.99} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
3 – (Na _{0.18} K _{0.06}) _{Σ0.24} (Ca _{1.74} Na _{0.26}) _{Σ2.00} (Mg _{3.02} Fe ²⁺ _{1.35} Fe ³⁺ _{0.51} Mn _{0.11} Al _{0.01}) _{Σ5.00} (Si _{7.51} Al _{0.49} Ti _{0.00}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
4 – (Na _{0.18} K _{0.12}) _{Σ0.30} (Ca _{1.64} Na _{0.36}) _{Σ2.00} (Mg _{4.87} Fe ³⁺ _{0.12} Mn _{0.01}) _{Σ5.00} (Si _{7.92} Al _{0.07}) _{Σ7.99} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
5 – (Na _{0.46} K _{0.08}) _{Σ0.54} (Ca _{1.37} Na _{0.56} Mg _{0.07}) _{Σ2.00} (Mg _{4.70} Fe ³⁺ _{0.27} Cr _{0.03}) _{Σ5.00} (Si _{7.59} Al _{0.34}) _{Σ7.93} O ₂₂ (OH) ₂ ;						
6 – (Na _{0.38} K _{0.11}) _{Σ0.49} (Ca _{1.26} Na _{0.69} Mg _{0.05}) _{Σ2.00} (Mg _{4.70} Fe ³⁺ _{0.29} Mn _{0.01}) _{Σ5.00} (Si _{7.61} Al _{0.34}) _{Σ7.95} O ₂₂ (OH) ₂ .						

Примечание. Вмещающие породы: 1–3 – амфиболит; 4–6 – метагипербазит.

Note. Country rocks: 1–3 – amphibolites; 4–6 – metaultramafic rock.

одинаково (K + Na 0.81 и 0.83 к.а.ф. при K/Na 0.56 и 0.57, соответственно).

В магнезиогастингситах и гастингситах из амфиболитов, в среднем, больше щелочей, Ti и Al (см. табл. 4, ан. 2, 6), чем в этих же минералах из гнейсов. Содержание Si в отдельных анализах составляет 5.97–6.42 к.а.ф. В амфиболах обычно примесь Cl, содержание которого не более 0.08 к.а.ф. (в среднем, 0.02 к.а.ф.). Изредка отмечается F, максимальное содержание которого достигает 0.25 к.а.ф. В гастингситах из куммингтонитсодержащих амфиболитов отмечается примесь Cr₂O₃ до 0.08 мас. %.

Среди метаморфических пород в гастингситах из амфиболита, содержащего пироксен и скаполит, наименьшие содержания Si составляют 5.71–5.92, в среднем, 5.86 к.а.ф. (см. табл. 4, ан. 7). В нём также минимальны содержания Mg, Mn и Na. Количество Ca наиболее близко к стехиометрическому значению – 1.92 к.а.ф.; постоянно присутствует примесь Cl 0–0.13 к.а.ф.; отношение K/Na высокое (0.68).

Внутри миаскитового массива магнезиогастингсит и гастингсит в сандытах составляют существенную долю амфиболов. Сумма щелочей в этих амфиболах (1.31–1.46 к.а.ф.) выше, чем в метаморфитах, т.е. близка к максимальному предельному значению. Выше и содержания Fe, Ti и Mn (см. табл. 4, ан. 4). Отношение K/Na сравнительно низкое (в среднем, 0.37–0.38). Содержание Ca в гастингситах из сандытов минимальное и не превышает 1.62 к.а.ф. (в среднем, 1.59 для магнезиогастингсита и 1.56 для гастингсита (см. табл. 4, ан. 4, 9)). Количество FeO в обоих минеральных видах практически одинаковое, и отличаются они, в основном, по содержанию Mg. В амфиболах рассматриваемого ряда присутствует заметное количество F (в среднем, 0.25 к.а.ф., в магнезиогастингситах – 0.02 к.а.ф., гастингситах – 0.11 к.а.ф.), часто отмечается примесь Cl и редко – примесь Cr.

Наиболее щелочные магнезиогастингситы в миаскитах. Содержание остальных химических компонентов примерно соответствует среднему составу Ильменского магнезиогастингси-

Таблица 4

Химический состав магнезиогастингсита (1–4), гастингсита (5–9) и калийгастингсита (10–11) Ильменогорского блока (мас. %)

Table 4

Chemical composition of magnesio-hastingsite (1–4), hastingsite (5–9) and potassic-hastingsite (10–11) of the Ilmenogorsky complex (wt %)

Комп-ты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	43.05	41.3	39.17	39.48	40.75	41.62	38.30	38.73	38.57	41.92	37.13
TiO ₂	0.43	0.72	0.98	1.03	0.83	1.05	0.77	1.06	1.00	0.30	0.86
Al ₂ O ₃	8.71	12.16	13.23	11.68	9.73	11.89	14.43	14.28	12.97	9.72	14.64
FeO	18.99	18.28	18.22	22.05	25.17	19.68	21.10	22.19	22.07	22.91	24.45
MnO	0.36	0.46	0.41	0.50	0.60	0.55	0.09	1.23	0.71	1.67	0.33
MgO	11.74	10.17	9.88	8.25	7.18	8.35	7.65	6.22	7.42	7.16	5.70
CaO	11.45	11.28	9.82	9.71	10.80	11.56	11.68	9.46	9.48	10.23	11.81
Na ₂ O	1.79	2.54	3.54	3.45	1.80	2.05	2.21	3.22	3.45	2.34	0.90
K ₂ O	1.51	1.21	1.98	1.95	1.53	1.62	1.74	2.06	1.98	1.98	2.16
Cl	–	0.07	–	0.01	–	0.08	0.34	–	0.02	–	–
H ₂ O	2.01	1.97	1.98	1.81	1.96	1.96	1.88	1.97	1.84	1.96	1.94
Сумма	100.04	100.21	99.21	100.27	100.35	100.41	100.18	100.42	99.76	100.19	99.22
n	1	12	2	3	1	4	9	3	6	1	1
Расчёт на 13 катионов											
1 – (Na _{0.36} K _{0.29})Σ0.65(Ca _{1.83} Na _{0.16} Mg _{0.01})Σ2.00(Mg _{2.59} Fe ²⁺ Fe ³⁺ Mn _{0.05})Σ5.00(Si _{6.41} Al _{1.53} Ti _{0.05})Σ7.99O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 2 – (Na _{0.54} K _{0.23})Σ0.77(Ca _{1.81} Na _{0.19})Σ2.00(Mg _{2.26} Fe ²⁺ Fe ³⁺ Al _{0.31} Ti _{0.08} Mn _{0.06})Σ5.00(Si _{6.17} Al _{1.83})Σ8.00O ₂₂ (OH) _{1.96} F _{0.02} Cl _{0.02} ; 3 – (Na _{0.62} K _{0.38})Σ1.00(Ca _{1.59} Na _{0.42})Σ2.01(Mg _{2.23} Fe ²⁺ Fe ³⁺ Al _{0.30} Ti _{0.11} Mn _{0.05})Σ5.00(Si _{5.93} Al _{2.07})Σ8.00O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 4 – (Na _{0.61} K _{0.38})Σ0.99(Ca _{1.59} Na _{0.41})Σ2.00(Mg _{1.88} Fe ²⁺ Fe ³⁺ Al _{0.12} Ti _{0.12} Mn _{0.07})Σ5.00(Si _{6.02} Al _{1.98})Σ8.00O ₂₂ (OH) _{1.85} F _{0.15} ; 5 – (Na _{0.30} K _{0.30})Σ0.60(Ca _{1.77} Na _{0.23})Σ2.00(Fe ²⁺ Mg _{1.97} Fe ³⁺ Mn _{0.08} Ti _{0.07})Σ5.00(Si _{6.22} Al _{1.75} Ti _{0.02})Σ7.99O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 6 – (Na _{0.48} K _{0.31})Σ0.79(Ca _{1.88} Na _{0.12})Σ2.00(Mg _{1.89} Fe ²⁺ Fe ³⁺ Al _{0.35} Ti _{0.12} Mn _{0.07})Σ5.00(Si _{6.31} Al _{1.69})Σ8.00O ₂₂ (OH) _{1.98} Cl _{0.02} ; 7 – (Na _{0.57} K _{0.34})Σ0.91(Ca _{1.91} Na _{0.09})Σ2.00(Fe ²⁺ Mg _{2.01} Fe ³⁺ Al _{0.69} Ti _{0.09} Mn _{0.01})Σ5.00(Si _{5.86} Al _{2.14})Σ8.00O ₂₂ (OH) _{1.91} Cl _{0.09} ; 8 – (Na _{0.50} K _{0.40})Σ0.90(Ca _{1.55} Na _{0.45})Σ2.00(Fe ²⁺ Mg _{1.90} Fe ³⁺ Al _{0.93} Ti _{0.16} Mn _{0.12})Σ5.00(Si _{5.91} Al _{2.09})Σ8.00O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 9 – (Na _{0.58} K _{0.39})Σ0.97(Ca _{1.56} Na _{0.44})Σ2.00(Fe ²⁺ Mg _{1.77} Fe ³⁺ Al _{1.06} Ti _{0.12} Mn _{0.09})Σ5.00(Si _{5.92} Al _{2.08})Σ8.00O ₂₂ (OH) _{1.89} F _{0.11} ; 10 – (K _{0.39} Na _{0.37})Σ0.76(Ca _{1.68} Na _{0.32})Σ2.00(Fe ²⁺ Mg _{2.05} Fe ³⁺ Al _{1.63} Ti _{0.89} Mn _{0.22} Al _{0.18} Ti _{0.03})Σ5.00(Si _{6.42} Al _{1.58})Σ8.00O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 11 – (K _{0.43} Na _{0.22})Σ0.65(Ca _{1.95} Na _{0.05})Σ2.00(Fe ²⁺ Mg _{2.08} Fe ³⁺ Ti _{1.08} Al _{0.10} Al _{0.39} Mn _{0.04})Σ5.00(Si _{5.73} Al _{2.27})Σ8.00O ₂₂ (OH) _{2.00} .											

Примечание. Содержание (мас. %) Cr₂O₃: ан. 2 – 0.01, ан. 4 – 0.03, ан. 9 – 0.02; F: ан. 2 – 0.04, ан. 4 – 0.32, ан. 9 – 0.23. Здесь и далее прочерк – не обнаружено. Вмещающие породы: 1, 5 – гнейс; 2, 6 – амфиболит; 3 – миаскит; 4, 9 – сандыит; 7, 11 – амфиболит с пироксеном и скаполитом; 8 – сэрнаит; 10 – сиенит. Коэффициенты (OH) рассчитаны как разность (2 – F_{к.а.ф.} – Cl_{к.а.ф.}).

Note. Content (wt. %) of Cr₂O₃: an. 2 – 0.01, an. 4 – 0.03, an. 9 – 0.02; F: an. 2 – 0.04, an. 4 – 0.32, an. 9 – 0.23. Here and hereafter, dash – not detected. Country rocks: 1, 5 – gneiss; 2, 6 – amphibolite; 4, 9 – sandyite; 7, 11 – pyroxene-scapolite rock; 8 – sarnait; 10 – syenite. The formula units of OH group are recalculated as a difference of (2 – F_{cf.} – Cl_{cf.}).

та (см. табл. 4, ан. 3). В породах, отвечающих по химическому составу сэрнаиту, распространён наименее магнезиальный, наиболее калиевый и титанистый гастингсит с наименьшим средним содержанием Si – 5.91 к.а.ф. (см. табл. 4, ан. 8).

В сиенитоподобных фенитах и скаполитизированных пироксенсодержащих амфиболитах обнаружен калийгастингсит; в минерале из фенитов больше Si, Na, Mn и Mg, но меньше K, Al и Ca (см. табл. 4, ан. 10, 11).

Ряд тарамита. Амфиболы этого ряда (ферроферритарамит, калийферроферритарамит, ферритарамит) приурочены к щелочным породам миаскитового массива, а также отмечаются в сиенитах приконтактной зоны.

По химическому составу ферроферритарамит и калийферроферритарамит из сиенитов экзоконтактной зоны миаскитового массива весьма близки (табл. 5, ан. 1, 4). Содержания кремния немного выше среднего содержания для данных минералов – 6.06 и 6.16 к.а.ф., соответственно. Содержание суммы ще-

Таблица 5

Химический состав (мас. %) ферроферритарамита (1–3), калийферроферритарамита (4–6) и ферритарамита (7) Ильменогорского блока (мас. %)

Table 5

Chemical composition of ferro-ferri-taramite (1–3), potassic-ferri-taramite (4–6) and ferri-taramite (7) of the Pimenogorsky complex (wt. %)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	39.24	36.46	37.17	40.15	36.12	37.58	38.25
TiO ₂	0.86	1.03	1.18	0.75	1.13	1.14	0.84
Al ₂ O ₃	10.59	13.38	13.53	10.88	13.38	13.27	13.83
FeO	27.64	27.76	24.96	27.02	29.06	26.59	22.13
MnO	1.02	1.64	1.19	0.83	1.20	1.17	0.43
MgO	5.28	3.44	5.06	5.34	3.17	4.76	7.65
CaO	8.24	8.35	8.66	8.13	8.56	8.79	9.15
Na ₂ O	3.52	3.81	3.74	3.06	3.02	2.69	3.75
K ₂ O	1.86	2.13	2.03	1.76	2.28	1.98	1.94
H ₂ O	1.94	1.75	1.83	1.96	1.91	1.95	1.97
Сумма	100.19	100.13	99.58	99.88	99.83	99.92	99.94
n	6	7	5	4	10	2	2
Расчёт на 13 катионов							
$1 - (\text{Na}_{0.42} \text{K}_{0.37} \text{Ca}_{1.36} \text{Na}_{0.64})_{\Sigma 2.00} (\text{Fe}^{2+}_{1.96} \text{Fe}^{3+}_{1.61} \text{Mg}_{1.21} \text{Mn}_{0.13} \text{Ti}_{0.09})_{\Sigma 5.00} (\text{Si}_{6.06} \text{Al}_{1.93} \text{Ti}_{0.01})_{\Sigma 8.00} \text{O}_{22} (\text{OH})_{2.00};$ $2 - (\text{Na}_{0.57} \text{K}_{0.43} \text{Ca}_{1.41} \text{Na}_{0.59})_{\Sigma 2.00} (\text{Fe}^{2+}_{2.23} \text{Fe}^{3+}_{1.42} \text{Mg}_{0.80} \text{Mn}_{0.22} \text{Al}_{0.21} \text{Ti}_{0.12})_{\Sigma 5.00} (\text{Si}_{5.73} \text{Al}_{2.27})_{\Sigma 8.00} \text{O}_{22} (\text{OH})_{1.83} \text{F}_{0.16} \text{Cl}_{0.01};$ $3 - (\text{Na}_{0.57} \text{K}_{0.40} \text{Ca}_{1.44} \text{Na}_{0.56})_{\Sigma 2.00} (\text{Fe}^{2+}_{2.02} \text{Fe}^{3+}_{1.23} \text{Mg}_{1.17} \text{Al}_{0.28} \text{Mn}_{0.16} \text{Ti}_{0.14})_{\Sigma 5.00} (\text{Si}_{5.79} \text{Al}_{2.21})_{\Sigma 8.00} \text{O}_{22} (\text{OH})_{1.90} \text{F}_{0.10};$ $4 - (\text{K}_{0.34} \text{Na}_{0.25} \text{Ca}_{1.34} \text{Na}_{0.66})_{\Sigma 2.00} (\text{Fe}^{2+}_{1.84} \text{Fe}^{3+}_{1.62} \text{Mg}_{1.22} \text{Al}_{0.12} \text{Mn}_{0.11} \text{Ti}_{0.09})_{\Sigma 5.00} (\text{Si}_{6.16} \text{Al}_{1.84})_{\Sigma 8.00} \text{O}_{22} (\text{OH})_{2.00};$ $5 - (\text{K}_{0.46} \text{Na}_{0.36} \text{Ca}_{1.44} \text{Na}_{0.56})_{\Sigma 2.00} (\text{Fe}^{2+}_{2.16} \text{Fe}^{3+}_{1.66} \text{Mg}_{0.74} \text{Mn}_{0.16} \text{Al}_{0.15} \text{Ti}_{0.13})_{\Sigma 5.00} (\text{Si}_{5.67} \text{Al}_{2.33})_{\Sigma 8.00} \text{O}_{22} (\text{OH})_{2.00};$ $6 - (\text{K}_{0.39} \text{Na}_{0.25} \text{Ca}_{1.45} \text{Na}_{0.55})_{\Sigma 2.00} (\text{Fe}^{2+}_{1.77} \text{Fe}^{3+}_{1.66} \text{Mg}_{1.09} \text{Al}_{0.20} \text{Mn}_{0.15} \text{Ti}_{0.13})_{\Sigma 5.00} (\text{Si}_{5.79} \text{Al}_{2.21})_{\Sigma 8.00} \text{O}_{22} (\text{OH})_{2.00};$ $7 - (\text{Na}_{0.60} \text{K}_{0.38} \text{Ca}_{1.49} \text{Na}_{0.51})_{\Sigma 2.00} (\text{Mg}_{1.73} \text{Fe}^{2+}_{1.59} \text{Fe}^{3+}_{1.23} \text{Al}_{0.30} \text{Ti}_{0.09} \text{Mn}_{0.06})_{\Sigma 5.00} (\text{Si}_{5.82} \text{Al}_{2.18})_{\Sigma 8.00} \text{O}_{22} (\text{OH})_{2.00}.$							

Примечание. Содержание (мас. %): в ан. 2 – 0.01 Cr₂O₃, 0.34 F, 0.03 Cl; в ан. 3 – 0.02 Cr₂O₃, 0.20 F, 0.01 Cl. Вмещающие породы: 1, 4 – сиенит; 2, 5 – миаскит; 3, 7 – сандыит, 6 – сэрнаит. Коэффициенты (ОН) рассчитаны как разность (2 – F_{к.а.ф.} – Cl_{к.а.ф.}).

Note. Contents (wt. %): in an. 2 – 0.01 Cr₂O₃, 0.34 F, 0.03 Cl; in an. 3 – 0.02 Cr₂O₃, 0.20 F, 0.01 Cl. Host rocks: 1, 4 – syenite; 2, 5 – miaskite; 3, 7 – sandyite; 6 – saernaite. The formula units of OH group are recalculated as a difference of (2 – F_{c.f.} – Cl_{c.f.}).

лочей в них ниже среднего значения, но в каждой из формульных позиций А и В сумма щелочей превышает 0.5 к.а.ф. В калийферроферритарамите содержание суммы щелочей меньше на 0.17 к.а.ф., чем в ферроферритарамите. Отношение К/Na при изменении видового состава меняется незначительно (0.35–0.38). В кристаллохимической позиции А в калийферроферритарамите из сиенита калия больше чем натрия – 0.34 и 0.25 к.а.ф., соответственно. Практически одинаковое количество в обоих минеральных видах Ti и Mn, близкое к среднему содержанию в амфиболах приконтактной зоны массива.

В ферроферритарамите и калийферроферритарамите из миаскитов выше содержания Na, K, Fe, Mn, Ca и Ti и ниже содержания Mg по сравнению с этими же минералами из зоны эндоконтакта (см. табл. 5, ан. 2, 5). Наиболее полно заселена кристаллохимическая позиция А. Среди миаскитовых тара-

митов в калийферроферритарамите, по сравнению с ферроферритарамитом, меньше Mg, Mn и Na на 0.10, 0.06 и 0.23 к.а.ф., соответственно. Отношение К/Na в калийферроферритарамите возрастает до 0.50. В нём также увеличивается содержание Fe³⁺ на 0.22 к.а.ф. (см. табл. 5, ан. 5). Количество Si (5.67–5.79 к.а.ф.) меньше среднего содержания, характерного для минералов этого ряда.

В ферроферритарамите из сандыитов меньше Fe и Mg на 0.32 и 0.13 к.а.ф., соответственно, по сравнению с этим минералом из миаскитов (см. табл. 5, ан. 3). Содержание остальных химических компонентов при пересчёте на кристаллохимические формулы почти не отличается.

Калийферроферритарамит из сэрнаита содержит меньше суммы щелочей на 0.19 к.а.ф. и Fe²⁺ – на 0.39 к.а.ф. и больше Mg на 0.35 к.а.ф., чем в этом же минерале из миаскитов (см. табл. 5, ан.

Таблица 6

**Химический состав зональных амфиболов из гнейсов (1–4) и амфиболитов (5–6)
Ильменогорского блока (мас. %)**

Table 6

**Chemical composition of zonal amphiboles from gneisses (1–4) and amphibolites (5–6)
of the Pimenogorsky complex (wt. %)**

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	44.95	43.03	42.61	43.73	43.60	41.88	42.36	42.58
TiO ₂	0.86	0.74	0.71	1.11	1.06	0.74	0.93	1.00
Al ₂ O ₃	8.68	9.68	9.91	8.65	10.24	10.66	10.85	10.28
FeO	18.32	19.79	19.84	19.52	18.94	19.09	18.11	18.82
MnO	0.04	0.06	0.22	0.23	0.22	0.21	0.08	0.23
MgO	11.06	10.39	11.33	10.31	10.43	10.82	10.7	11.01
CaO	12.7	12.60	12.31	12.58	11.29	11.8	11.41	11.47
Na ₂ O	0.81	1.02	0.44	0.83	1.27	2.41	2.25	1.51
K ₂ O	1.09	1.29	1.20	1.30	1.17	1.38	1.39	1.23
H ₂ O	2.02	2.01	2.04	2.00	2.03	2.01	2.01	2.02
Сумма	98.51	98.6	98.57	98.26	98.22	98.99	98.08	98.13
Расчёт на 13 катионов								
1 – (Na _{0,23} K _{0,21} Ca _{0,02}) _{Σ0,46} Ca _{2,00} (Mg _{2,44} Fe ²⁺ _{1,79} Fe ³⁺ _{0,48} Al _{0,18} Ti _{0,10} Mn _{0,01}) _{Σ5,00} (Si _{6,67} Al _{1,33}) _{Σ8,00} O ₂₂ (OH) _{2,00} ; 2 – (Na _{0,30} K _{0,25} Ca _{0,02}) _{Σ0,57} Ca _{2,00} (Mg _{2,31} Fe ²⁺ _{1,76} Fe ³⁺ _{0,71} Al _{0,13} Ti _{0,08} Mn _{0,01}) _{Σ5,00} (Si _{6,42} Al _{1,58}) _{Σ8,00} O ₂₂ (OH) _{2,00} ; 3 – (K _{0,22} Na _{0,06}) _{Σ0,28} (Ca _{1,94} Na _{0,06}) _{Σ2,00} (Mg _{2,48} Fe ²⁺ _{1,38} Fe ³⁺ _{1,06} Ti _{0,05} Mn _{0,03}) _{Σ5,00} (Si _{6,26} Al _{1,72} Ti _{0,02}) _{Σ8,00} O ₂₂ (OH) _{2,00} ; 4 – (K _{0,25} Na _{0,24} Ca _{0,02}) _{Σ0,51} Ca _{2,00} (Mg _{2,30} Fe ²⁺ _{1,89} Fe ³⁺ _{0,56} Ti _{0,13} Al _{0,09} Mn _{0,03}) _{Σ5,00} (Si _{6,56} Al _{1,44}) _{Σ8,00} O ₂₂ (OH) _{2,00} ; 5 – (K _{0,22} Na _{0,15}) _{Σ0,37} (Ca _{1,79} Na _{0,21}) _{Σ2,00} (Mg _{2,29} Fe ²⁺ _{1,39} Fe ³⁺ _{0,95} Al _{0,22} Ti _{0,12} Mn _{0,03}) _{Σ5,00} (Si _{6,44} Al _{1,56}) _{Σ8,00} O ₂₂ (OH) _{2,00} ; 6 – (Na _{0,58} K _{0,26}) _{Σ0,84} (Ca _{1,88} Na _{0,12}) _{Σ2,00} (Mg _{2,40} Fe ²⁺ _{1,62} Fe ³⁺ _{0,76} Al _{0,11} Ti _{0,08} Mn _{0,03}) _{Σ5,00} (Si _{6,24} Al _{1,76}) _{Σ8,00} O ₂₂ (OH) _{2,00} ; 7 – (Na _{0,48} K _{0,26}) _{Σ0,74} (Ca _{1,83} Na _{0,17}) _{Σ2,00} (Mg _{2,38} Fe ²⁺ _{1,61} Fe ³⁺ _{0,65} Al _{0,24} Ti _{0,11} Mn _{0,01}) _{Σ5,00} (Si _{6,33} Al _{1,67}) _{Σ8,00} O ₂₂ (OH) _{2,00} ; 8 – (Na _{0,25} K _{0,23}) _{Σ0,48} (Ca _{1,82} Na _{0,18}) _{Σ2,00} (Mg _{2,43} Fe ²⁺ _{1,26} Fe ³⁺ _{1,07} Al _{0,10} Ti _{0,11} Mn _{0,03}) _{Σ5,00} (Si _{6,31} Al _{1,69}) _{Σ8,00} O ₂₂ (OH) _{2,00} .								

Примечание. Номера анализов соответствуют номерам точек на рис. 5. Минеральные виды: 1 – магнезиоферригорнблендит; 2, 6, 7 – магнезиогастингсит; 3, 5, 8 – ферричермакит; 4 – калийэдениит.

Note. Numbers of analyses correspond to those in Fig. 5. Mineral species: 1 – magnesio-ferri-hornblende; 2, 6, 7 – magnesio-hastingsite; 3, 5, 8 – ferrit-schermakite; 4 – potassic-edenite.

6). Содержание остальных химических элементов практически одинаково.

В сандыитах отмечается ферритарамит, в котором, в среднем, минимальны содержания Fe²⁺ (1.59 к.а.ф.) и максимальны содержания Mg (1.73 к.а.ф.) (см. табл. 5, ан. 7). Количество остальных химических элементов существенно не отличается от их содержаний в ферроферритарамите из сандыитов.

В фирситах восточного экзоконтакта миаскитового массива также наблюдались низкокремнистые амфиболы: калийферрисаданагаит, саданагаит (Баженов и др. 1998, 1999; Никандров и др., 2000). Высококремнистые натриевокальциевые и натриевые амфиболы (рихтерит, фторрихтерит, калийфторрихтерит, винчит, ферровинчит, магнезиорибекит, фтормагнезиоарфведсонит, ферроактинолит) наблюдались в поздних секущих жилах с кварцем и карбонатами, преимущественно в зоне фенитов

(Баженов и др., 2000; Никандров и др., 2000; Баженов, Муфтахов, 2006).

Индивиды амфиболов часто зональны. В пределах отдельных зёрен наиболее контрастное изменение составов амфиболов у фенитизированных гнейсов. В отдельных зёрнах насчитывается до четырёх минеральных видов (табл. 6, ан. 1–4; рис. 5а). Это обстоятельство обусловлено колебаниями содержаний химических элементов около граничных значений для кристаллохимических позиций А и С. В анализе 4 таблицы 6 количество К в позиции А больше количества Na на 0.01 к.а.ф., и по правилам ММА минерал следует отнести к калийэденииту. Обычно края индивидов амфиболов более кремнистые.

Менее контрастное изменение состава индивидов амфиболов из амфиболитов. В пределах индивидов колебания составов характерны, в основном, для кристаллохимической позиции А (см. табл. 6, ан. 5–8; см.

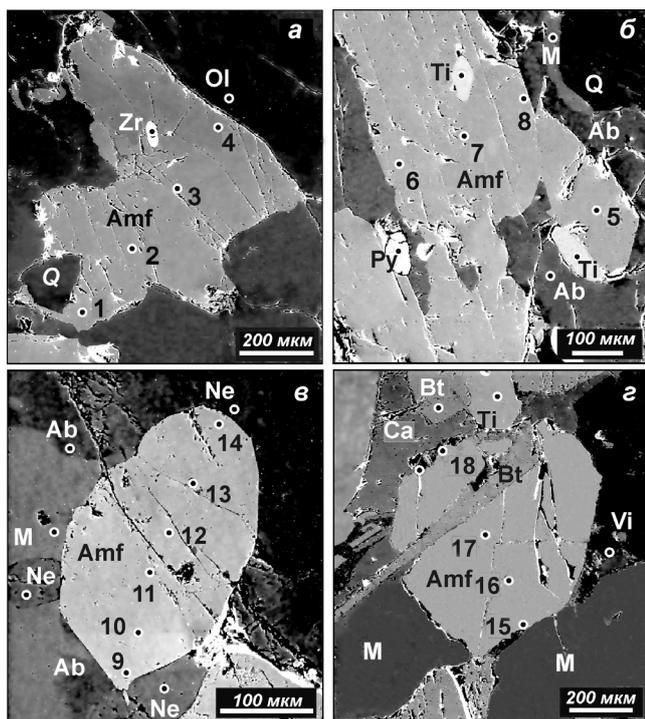


рис. 5б). Подобная картина наблюдается у индивидов амфибола в миаскитах: колебания около граничных значений количеств Na и K в формульной позиции А (табл. 7, ан. 9–14; см. рис. 5в) либо Na в формульной позиции В (см. табл. 7, ан. 15–18; см. рис. 5г).

Распределение видового состава амфиболов по породам вертикального разреза

В амфиболитах половина амфибола относится к ферричермакиту. По 16 % приходится на магнезиоферригорнблендит и магнезиогастингсит. Остальное количество приходится (в порядке убывания) на эденит, гастингсит, магнезиогорнблендит и ферроферригорнблендит. В интервале 178–202 м скважины С-2000 список амфиболов дополняется куммингтонитом с грюнеритом, тремолитом, местами сконцентрированным в прослоях, содержащих плагиоклаз, кварц, биотит, гранат (Макагонов и др., 2003; Медведева, 2006).

В амфиболсодержащих гнейсах и плагиосланцах развиты преимущественно ферроферричермакит, реже – эденит, ферроферригорнблендит, магнезиогастингсит и гастингсит. В плагиосланцах добавляется калийэденит. В скаполитизированных пироксен-плагиоклазовых-амфиболовых породах амфибол представлен, в основном, гастингситом. В метагипербазитовом теле (интервал 336.7–340.5 м) распространены тремолит, эденит, рихтерит и ферривинчит.

МИНЕРАЛОГИЯ 4(3) 2018

Рис. 5. Зональные индивиды амфибола из гнейса (а), амфиболита (б), миаскита (в) и сандыита (г).

Al – альбит; Amf – амфибол; Q – кварц, M – микроклин; Ne – нефелин; Ol – олигоклаз; Py – пирит; Ti – титанит; Vi – вишневит; Zr – циркон. Цифры соответствуют анализам табл. 6, 7.

Fig. 5. Zonal amphiboles of gneiss (a), amphibolite (б), miaskite (в) and sandyite (г).

Al – albite; Amf – amphibole; Q – quartz, M – microcline; Ne – nepheline; Ol – oligoclase; Py – pyrite; Ti – titanite; Vi – vishnevit; Zr – zircon. Numbers correspond to those in Tables 6 and 7.

Верхние горизонты фенитов содержат ферричермакит, ферриэденит, гастингсит и калиймагнезиогастингсит. В фенитах из приконтактовой зоны миаскитового массива среди амфиболов преобладает ферроферритарамит, реже – калийферроферритарамит.

В миаскитах половина амфиболов представлена ферроферритарамитом, четверть – калийферритарамитом, остальная часть приходится на магнезиогастингсит и гастингсит. В сандыитах обычны гастингсит, магнезиогастингсит, реже ферроферритарамит и ферритарамит.

Определение термобарометрических параметров амфиболовых пород скважины С-2000

Определение термобарометрических параметров образцов пород из скважины С-2000 выполнено с помощью прикладного программного обеспечения PetroExplorer v. 4.0 alpha (Кориневский, 2015). Для определения параметров использовались результаты 199 микрозондовых анализов минералов из 19 образцов горных пород, из них: 116 анализов амфиболов, 66 анализов полевых шпатов и 17 анализов пироксенов.

Исходя из состава минеральных парагенезисов исследуемых образцов, для определения давления применялся амфиболовый геобарометр в двух вариантах (Hammarstrom, Zen, 1986; Schmidt, 1991).

Таблица 7

Химический состав зональных амфиболов из миаскитов Ильменогорского массива (мас. %)

Table 7

Chemical composition of zonal amphiboles from miaskites of the Ilmenogorsky complex (wt. %)

Компоненты	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO ₂	36.77	36.22	36.73	36.97	36.64	37.03	38.26	38.23	38.23	38.25
TiO ₂	0.96	1.21	0.89	1.07	1.09	0.57	0.80	0.91	0.87	1.13
Al ₂ O ₃	13.92	14.42	14.61	14.54	14.11	13.59	13.31	13.39	14.35	13.9
FeO	27.95	27.05	26.58	27.16	27.86	28.09	22.33	22.74	21.92	21.62
MnO	2.18	1.86	1.72	1.80	1.67	1.78	0.34	0.64	0.52	0.66
MgO	3.16	3.73	3.45	3.40	3.59	2.92	7.67	7.27	7.63	7.71
CaO	8.40	8.67	8.03	8.39	8.27	8.37	9.12	9.64	9.17	9.51
Na ₂ O	3.02	3.06	4.11	2.86	3.22	3.78	3.90	3.11	3.60	3.59
K ₂ O	2.16	2.35	2.11	2.13	2.04	2.05	1.89	1.97	1.98	1.99
H ₂ O	1.93	1.93	1.92	1.94	1.94	1.91	1.96	1.96	1.92	1.97
Сумма	98.52	98.57	98.23	98.32	98.49	98.18	97.62	97.9	98.27	98.36
Расчёт на 13 катионов										
9 – (K _{0.43} Na _{0.30}) _{Σ0.73} (Ca _{1.40} Na _{0.60}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{1.92} Fe ³⁺ _{1.70} Mg _{0.73} Mn _{0.29} Al _{0.25} Ti _{0.11}) _{Σ5.00} (Si _{5.70} Al _{2.30}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 10 – (K _{0.46} Na _{0.36}) _{Σ0.82} (Ca _{1.44} Na _{0.56}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{1.91} Fe ³⁺ _{1.60} Mg _{0.86} Al _{0.25} Mn _{0.24} Ti _{0.14}) _{Σ5.00} (Si _{5.61} Al _{2.39}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 11 – (Na _{0.58} K _{0.42}) _{Σ1.00} (Ca _{1.34} Na _{0.66}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{2.14} Fe ³⁺ _{1.32} Mg _{0.80} Al _{0.41} Mn _{0.23} Ti _{0.10}) _{Σ5.00} (Si _{5.72} Al _{2.28}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 12 – (K _{0.42} Na _{0.24}) _{Σ0.66} (Ca _{1.39} Na _{0.61}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{1.87} Fe ³⁺ _{1.64} Mg _{0.78} Al _{0.35} Mn _{0.24} Ti _{0.12}) _{Σ5.00} (Si _{5.71} Al _{2.29}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 13 – (K _{0.40} Na _{0.33}) _{Σ0.73} (Ca _{1.37} Na _{0.63}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{1.84} Fe ³⁺ _{1.75} Mg _{0.83} Al _{0.23} Mn _{0.22} Ti _{0.13}) _{Σ5.00} (Si _{5.66} Al _{2.34}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 14 – (Na _{0.56} K _{0.41}) _{Σ0.97} (Ca _{1.41} Na _{0.59}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{2.33} Fe ³⁺ _{1.35} Mg _{0.68} Al _{0.33} Mn _{0.24} Ti _{0.07}) _{Σ5.00} (Si _{5.81} Al _{2.19}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 15 – (Na _{0.65} K _{0.37}) _{Σ1.02} (Ca _{1.50} Na _{0.50}) _{Σ2.00} (Mg _{1.75} Fe ²⁺ _{1.67} Fe ³⁺ _{1.19} Al _{0.26} Ti _{0.09} Mn _{0.04}) _{Σ5.00} (Si _{5.86} Al _{2.14}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 16 – (Na _{0.50} K _{0.38}) _{Σ0.88} (Ca _{1.58} Na _{0.42}) _{Σ2.00} (Fe ²⁺ _{1.67} Mg _{1.66} Fe ³⁺ _{1.24} Al _{0.25} Ti _{0.10} Mn _{0.08}) _{Σ5.00} (Si _{5.84} Al _{2.16}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 17 – (Na _{0.54} K _{0.38}) _{Σ0.92} (Ca _{1.49} Na _{0.51}) _{Σ2.00} (Mg _{1.72} Fe ²⁺ _{1.50} Fe ³⁺ _{1.27} Al _{0.34} Ti _{0.10} Mn _{0.07}) _{Σ5.00} (Si _{5.78} Al _{2.22}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} ; 18 – (Na _{0.60} K _{0.39}) _{Σ0.99} (Ca _{1.55} Na _{0.45}) _{Σ2.00} (Mg _{1.75} Fe ²⁺ _{1.64} Fe ³⁺ _{1.10} Al _{0.30} Ti _{0.13} Mn _{0.08}) _{Σ5.00} (Si _{5.81} Al _{2.19}) _{Σ8.00} O ₂₂ (OH) _{2.00} .										

Примечание. Номера анализов соответствуют номерам точек на рис. 5. Минеральные виды: 9, 10, 12, 13 – калиферроферритарамит; 11, 14 – ферроферритарамит; 15, 17 – ферритарамит; 16 – гастингсит; 18 – магнезиогастингсит.

Note. Numbers of analyses correspond to those in Fig. 5. Mineral species: 9, 10, 12, 13 – potassic-ferro-ferri-taramite; 11, 14 – ferro-ferri-taramite; 15, 17 – ferri-taramite; 16 – hastingsite; 18 – magnesio-hastingsite.

Для определения температуры применялись четыре варианта амфибол-плаггиоклазового геотермометра (Spear, 1981; Jaques et al., 1982; Blundy, Holland, 1990; Holland, Blundy, 1994). Также использовался графический амфибол-плаггиоклазовый геотермометр Г.Б. Ферштатера (1990). Для бесполовошпатовых пород применялся амфибол-клинопироксеновый геотермометр Л.П. Плюсниной (1983). Результаты определений статистически обрабатывались и усреднялись для каждого образца. Усреднённые определения давления и температуры представлены в табл. 8. На диаграммы были вынесены области распределения термобарометрических параметров для разных типов пород, созданные методом построения выпуклых поверхностей по набору фигуративных точек (рис. 6, 7).

Из диаграмм видно, что амфиболиты характеризуются термобарометрическими параметрами амфиболитовой фации метаморфизма: давлением 5–6 кбар и температурами 600–660 °С. Высокое давление до 9 кбар фиксируется у обломков пироксенового амфиболита в скаполитсодержащей породе, а низкое давление до 1.2 кбар отмечается у куммингтонитсодержащей породы (см. табл. 8). Гнейсы являются наименее метаморфизованными образованиями в пределах низов амфиболитовой фации: давление 3.5–4.8 кбар и температура до 605 °С. Миаскиты характеризуются высоким давлением 8–9 кбар и температурами 600–700 °С. Изменённые миаскиты и фениты показывают менее высокие температуры и давления – около 600 °С и 4.5–6.5 кбар.

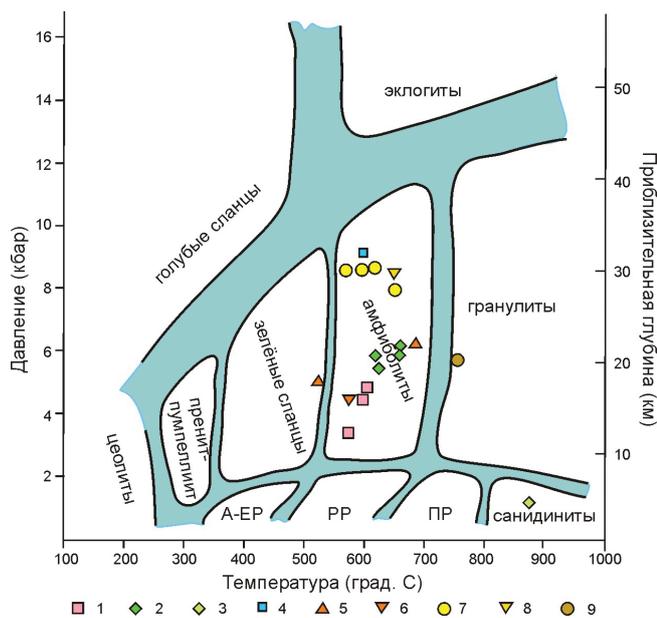


Рис. 6. Фигуративные точки образцов горных пород (по данным табл. 8) и термобарометрические параметры пород на диаграмме термобарометрической классификации метаморфических фаций.

1 – гнейс; 2 – амфиболит; 3 – амфиболит с куммингтонитом; 4 – пироксен-скаполит-плагиоклазовые породы; 5 – фенит; 6 – миаскит; 7 – сэрнаит; 8 – сандыит; 9 – мельтейгит. А-ЕР – альбит-эпидотовые роговики; РР – роговообманковые роговики; ПР – пироксеновые роговики (Yardley, 1991).

Fig. 6. Data points of rock samples (according to Table 8) and thermobarometric parameters of rocks on the diagram of thermobarometric classification of metamorphic facies.

1 – gneiss; 2 – amphibolite; 3 – amphibolite with cummingtonite; 4 – pyroxene-scapolite-plagioclase rock; 5 – fenite; 6 – miaskite; 7 – saernaite; 8 – sandyite; 9 – melt-eigite. А-ЕР – albite-epidotic hornfels; РР – hornblende hornfels; ПР – pyroxene hornfels (Yardley, 1991).

Обсуждение результатов и выводы

В истории становления Ильменогорского массива выделено два основных периода, которые устанавливаются по геологическим данным и подтверждаются определением двух возрастных групп цирконов: 420–380 и 260–240 млн лет (Краснобаев и др., 2016). Первый период связан со становлением массива, второй – с его преобразованием. Наряду с изотопными соотношениями, указывающими на магматогенную природу цирконов, значительная часть анализов попадает в поле гидротермального генезиса. Это интерпретировано как метасоматическое преобразование ранних цирконов (Красно-

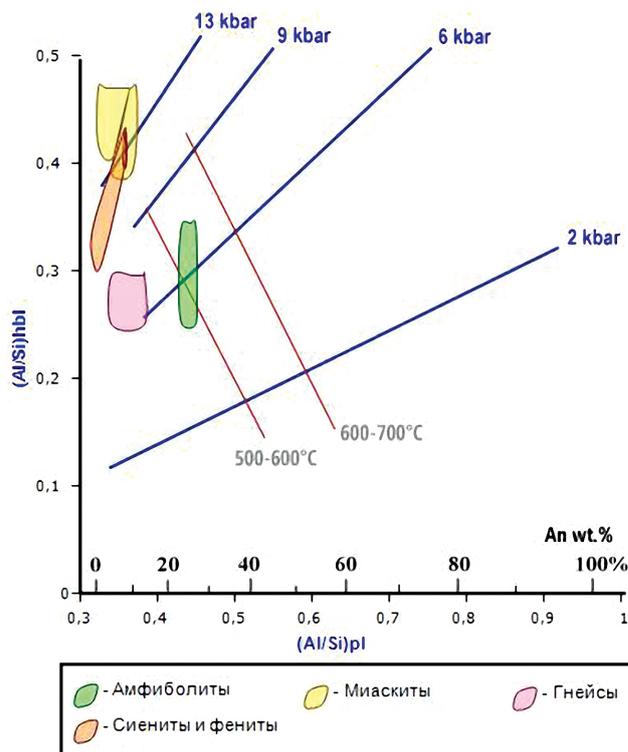


Рис. 7. Распределение амфибол-плагиоклазовых парагенезисов для различных типов пород на диаграмме графического амфибол-плагиоклазового геотермобарометра Г.Б. Ферштатера (1990).

Fig. 7. Distribution of amphibole-plagioclase assemblages in different types of rocks according to amphibole-plagioclase geothermobarometer (Fershtater, 1990).

баев и др., 2016) или метаморфогенные генерации (Недосекова и др., 2016). Сделан вывод, что и сами миаскиты могут быть метасоматической природы (Краснобаев и др., 2016). В сущности, этот вывод подтверждает гипотезу палингенного происхождения миаскитов под влиянием глубинных (мантийных) флюидов.

Образование фенитов связывают с постмагматической деятельностью (Левин, 1974) или сопряжённым образованием субмеридиональных гранитоидных и сиенитовых blastsмилолитов при температуре 450–550 °С и флюидном давлении 10–13 кбар, и диопсид-скаполитовых амфиболитов – при формировании региональной сдвиговой зоны (Ворошук, Русин, 2003; Русин и др., 2006; Банева, Русин, 2014).

Наши данные указывают на несомненную связь формирования фенитов со временем становления миаскитового массива. Влияние щелочных про-

Таблица 8

**Усреднённые термобарометрические параметры образцов горных пород
Ильменогорского массива и его кровли**

Table 8

Averaged thermobarometric parameters of rock samples of the Ilmenogorsky complex and its top

№ обр.	Порода	P (kbar)	T (°C)
7/6	гнейс	3.4	572
19/4	амфиболит	5.8	622
20/17-1	гнейс	4.5	595
25/9	амфиболит	6.1	661
40/17	амфиболит	5.5	631
113/3	амфиболит пироксеновый скаполитизированный	9.1	600
201/9	амфиболит	5.9	661
202/6	амфиболит куммингтонизированный	1.2	881
206/2	гнейс	4.8	605
371/3	фенит	5.0	526
376/4	сиенит	4.4	579
488/6	фенит	6.2	686
528/3	миаскит	8.8	599
609/1	метасоматит по миаскиту	7.9	655
1637/6	сэрнаит	8.4	651
1882/2	контакт миаскита с меланократовой породой	5.7	758
1983/2	катаклазит по миаскиту	8.6	609
1986/9-2	меланократовый миаскит	8.5	575
1999/2	миаскит	8.5	600

Примечание. Первая цифра номера образца соответствует глубине отбора образца по скважине С-2000.
Note. The first digit of sample number corresponds to the depth of sampling of borehole С-2000.

цессов наиболее чётко прослеживается на составах амфиболов из семейства гастингсит–тарамит. На диаграмме (Na + K) – Si отчётливо выделяется тенденция изменения составов амфиболов: по мере уменьшения содержания Si увеличивается содержание щелочей в порядке следования: гнейс–амфиболит–фенит+сиенит–сандыит–миаскит (рис. 8а). Наименьшее содержание щелочей у гастингситов из гнейсов и куммингтонитсодержащих амфиболитов. Отдельное поле формируют малокремнистые и малощелочные гастингситы из скаполитизированных пироксенсодержащих амфиболитов.

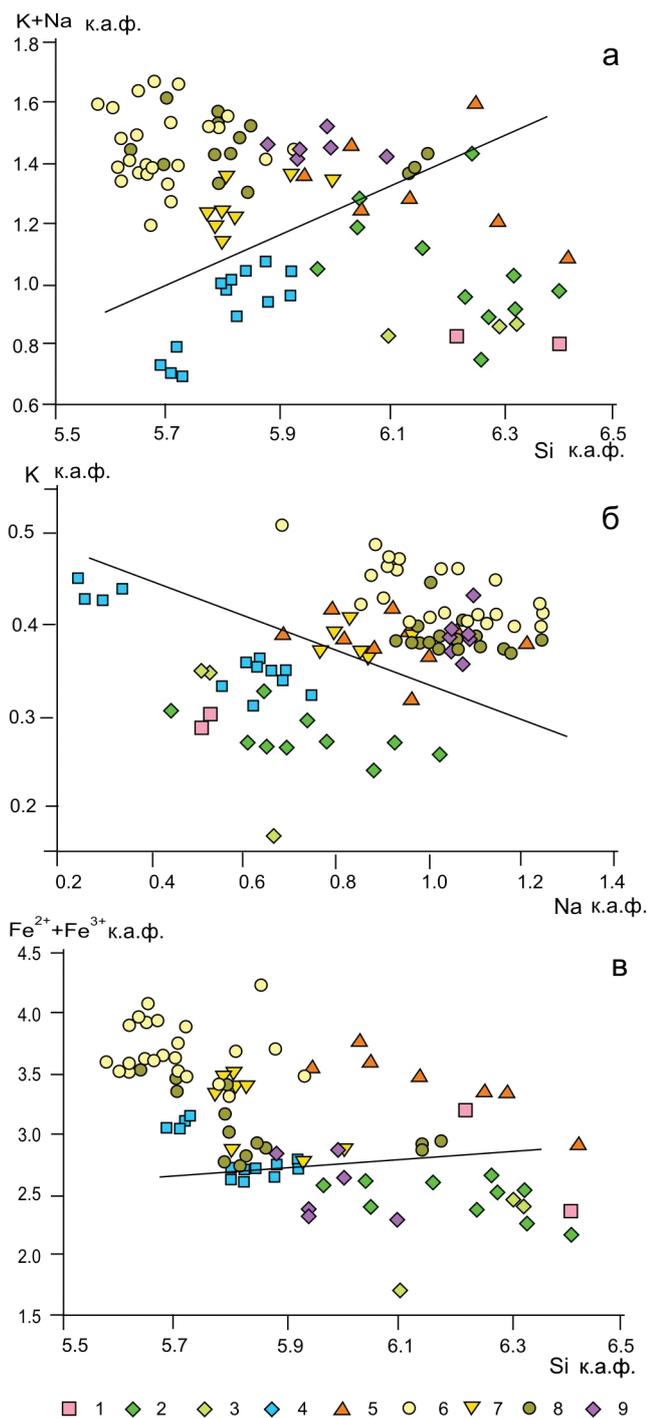
В породах массива, отнесённых по химическому составу к мельтейгиту, при среднем количестве Si содержание щелочей в амфиболах находится на уровне амфиболов из миаскитов, а у амфиболов из аналога сэрнаита, обогащенного цеолитами, при низком количестве Si содержание щелочей находится на уровне амфиболов из фенитов (см. рис. 8а).

При общей тенденции возрастания содержания K и Na в амфиболах в ряду гнейс+амфиболит–фенит+сиенит–сандыит–миаскит порядок смены составов более чётко выделяется по содержанию K (см. рис. 3б, 8б). На графике выделяется отдельная группа анализов малонатриевых калийгастингситов из скаполитизированных пироксенсодержащих

амфиболитов (синие квадраты в левой верхней части рис. 8б).

В целом, изменение содержания щелочей и соотношение K/Na в амфиболах пород в ряду гнейс+амфиболит–фенит+сиенит–сандыит–миаскит подобно изменению количества щелочей в общих анализах этих пород и подтверждает непосредственную связь образования фенитового ореола со становлением миаскитового массива. В поздних жильных сиенитовых и фенитоподобных ассоциациях амфиболы более высококремниевые и высоконатриевые.

Содержание железа в амфиболах определяется поведением щелочей. График Fe–Si подобен графику (Na + K) – Si (см. рис. 8а, в), т.к. при возрастании количества щелочей возрастает и содержание железа. При этом у Fe более чёткая связь с K. На приоритет кристаллохимического фактора над геохимическим при кристаллизации амфиболов указывают противоположные тренды увеличения содержания Fe в зависимости от содержания Si: при уменьшении количества Si в амфиболах тренд направлен от меланократовых пород к лейкократовым, а во вмещающих их породах тренд проходит от лейкократовых пород к меланократовым (см. рис. 8 и рис. 2в).



Количество Са и Mg в амфиболах прямо противоположно содержанию Fe со щелочами, что соответствует изоморфному замещению $(Na + Fe) \rightarrow (Mg + Ca)$. При этом в самих породах изменение содержаний СаО и MgO по сравнению с содержаниями с SiO₂ подобно графику $(FeO + Fe_2O_3) - SiO_2$.

В целом, закономерности изменения состава амфиболов подтверждают, что формирование основного площадного фенитового ореола кровли Ильменогорского массива непосредственно связа-

Рис. 8. Особенности химического состава амфиболов семейства гастингситы–тарамиты в породах Ильменогорского миаскитового массива и его кровли (скважина С-2000).

1 – гнейс; 2 – амфиболит; 3 – амфиболит с куммингтонитом; 4 – пироксен-скаполит-плагиоклазовые породы; 5 – фенит; 6 – миаскит; 7 – сэрнаит; 8 – сандыит; 9 – мельтейгит.

Fig. 8. Peculiarities of chemical composition of amphiboles of the hastingsite-taramite series in rocks of the Ilmenogorskiy miaskite complex and its top (borehole S-2000):

1 – gneiss; 2 – amphibolite; 3 – amphibolite with cummingtonite; 4 – pyroxene-scapolite-plagioclase rocks; 5 – fenite; 6 – miaskite; 7 – saernaite; 8 – sandyite; 9 – melteigite.

но со становлением самого массива в первый период. Для поздних жильных образований фенит-сиенитовых и гранитоидных парагенезисов характерны наиболее кремнистые и наиболее щелочные амфиболы. Второй период связан с метаморфизмом ранее сформировавшегося комплекса метаморфических и магматических пород.

В опытах по плавлению Ильменогорского амфибол-биотитового миаскита полное плавление было достигнуто только при давлении 1.5 кбар и температуре 960 °С (Щекина и др., 1984). При 4 и 6 кбар порода не плавилась даже при самых высоких температурах. Температура солидуса при повышении давления водяного пара постепенно уменьшалась от 735 ± 5 °С при 1.5 кбар до 675 ± 15 °С при 4 кбар и 645 ± 15 °С при 6 кбар. Порядок кристаллизации, установленный по микроструктурным наблюдениям, совпадает с полученным экспериментально в интервале параметров: $P = 3-5$ кбар, $T = 700-800$ °С.

Наши термодинамические параметры для пород всего комплекса метаморфитов и магматитов фиксируют условия метаморфизма после становления миаскитового массива. Ранее нами на основе анализа пересечения и характера деформации геологических тел была показана неоднократная смена геодинамических режимов с образованием продуктов пластических и хрупких преобразований (Макагонов и др., 2003). Термодинамические данные по миаскитам как в прикровлевых частях массива, так и на забое скважины С-2000 (глубине 1500 м от кровли массива) практически идентичны: давление 8.5–8.8 кбар и температура 575–600 °С. Эти параметры характерны для проявления мета-

морфических условий и хорошо коррелируют с данными других исследователей по аналогичным комплексам и оценками условий метаморфизма щелочных массивов. Так, щелочные комплексы восточного Онтарио и северной Норвегии метаморфизованы при температуре 700 °С и давлении 7 кбар (Appleyard, 1974). Внутри Ильменогорского массива меньшие величины давлений получены для метасоматитов, катаклазитов и на контактах пород с разными физическими свойствами.

Высокий метаморфизм пород массива связан с их находением в сжатом ядре факолитобразной формы (ядре антиклинорной структуры). В облекающих породах метаморфизм проявлялся неравномерно. Парагенезисы с термодинамическими параметрами, подобными миаскитовым, установлены в реликтовых участках пироксеновых амфиболитов с калигастингситом, которые сохранились в скаполитовом цементе микробрекчий (образец № 113/3 в табл. 8). В целом, породы кровли метаморфизованы в условиях низов амфиболитовой фации. Наибольшие отклонения от средних температурных параметров у фенитов, но по давлению близкие к метаморфитам, по которым они развиваются. По-видимому, при образовании антиклинорной структуры возникали и зоны срыва с падением давления, в которых и формировались куммингтонитовые парагенезисы.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117020250032-1 Института минералогии УрО РАН.

Литература

- Баженов А.Г., Баженова Л.Ф., Кринова Т.В., Хворов П.В.** (1999) Калийферрисадаанагаит (K,Na)Ca₂(Fe²⁺,Mg)₃(Fe³⁺,Al)₂[Si₅Al₃](OH)₂ – новый минеральный вид в группе амфиболов (Ильменские горы, Южный Урал). *Записки ВМО*, **128**(4), 50–55.
- Баженов А.Г., Баженова Л.Ф., Поляков В.О.** (1998) Садаанагаит из щелочного комплекса Ильменских гор. *Записки ВМО*, **127**(1), 74–78.
- Баженов А.Г., Недосекова И.Л., Кринова Т.В., Миронов А.Б., Хворов П.В.** (2000) Фтормагнезиоарфведсонит NaNa₂(Mg,Fe²⁺)₄Fe³⁺[Si₈O₂₂](F,OH)₂ – новый минеральный вид в группе амфиболов (щелочной комплекс Ильменских-Вишневых гор, Южный Урал). *Записки ВМО*, **129**(6), 28–35.
- Баженов А.Г., Муфтахов В.А.** (2006) Амфиболы Ильменогорского миаскитового массива и его обрамления. *Геохимия, петрология, минералогия и генезис щелочных пород*. Миасс, ИМин УрО РАН, 18–21.
- Банева Н.Н., Русин А.И.** (2014) Структурно-вещественная эволюция и изотопный возраст Ильмено-Вишневогорского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*, (2), 131–137.
- Вализер П.М., Кобяшев Ю.С., Никандров С.Н.** (2004) Амфиболы Урала. Миасс, ИГЗ УрО РАН, 139 с.
- Ворошук Д.В., Русин А.И.** (2003) Опорный геологический разрез средней части Ильменогорско-Сысертской полиметаморфической зоны. *Путеводитель геологических экскурсий*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 64–95.
- Кориневский Е.В.** (2015) PetroExplorer – система для создания геохимических информационно-аналитических массивов в процессе тематических исследований. *Геоинформатика*, (4), 48–53.
- Краснобаев А.А., Вализер П.М., Бушарина С.В., Медведева Е.В.** (2016) Цирконология миаскитов Ильменских гор (Южный Урал). *Геохимия*, (9), 797–813.
- Левин В.Я.** (1974) Щелочная провинция Ильменских-Вишневых гор на Урале. М., Наука, 223 с.
- Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселев А.П.** (1997) Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург, Уралгеолком, 274 с.
- Макагонов Е.П., Баженов А.Г., Вализер Н.И., Новокрещенова Л.Б., Плохих Н.И., Варлаков А.С.** (2003) Глубинное строение Ильменогорского миаскитового массива. Миасс, УрО РАН, 180 с.
- Макагонов Е.П., Миронов А.Б.** (2005) Биотиты из биотитовых миаскитов глубоких горизонтов Ильменогорского миаскитового массива. *Уральский минералогический сборник № 13*. Миасс, ИМин УрО РАН, 34–42.
- Макагонов П.Е.** (1999) Полевые шпаты из биотитовых миаскитов глубоких горизонтов Ильменогорского массива, Южный Урал. *Уральская летняя минералогическая школа-96 (материалы)*. Екатеринбург, УГГА, 240–242.
- Медведева Е.В.** (2006) Амфиболы из пород ильменогорской толщи: состав и взаимоотношения. *Уральский минералогический сборник № 14*. Миасс, ИМин УрО РАН, 225–232.
- Никандров С.Н., Кобяшев Ю.С., Вализер П.М.** (2000) Амфиболы Ильменогорского комплекса. Миасс, ИГЗ РАН, 120 с.
- Недосекова И.Л., Беляцкий Б.В., Белоусова Е.А.** (2016) Редкие элементы и изотопный состав гафния как индикаторы генезиса циркона при эволюции щелочно-карбонатитовой магматической системы (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Урал, Россия). *Геология и геофизика*, 2016, **57**(6), 1135–1154.
- Петрографический кодекс России (2008) Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб, ВСЕГЕИ, 200 с.
- Плюснина Л.П.** (1983). Экспериментальные исследования метаморфизма базитов. М., Наука, 159 с.
- Русин А.И., Краснобаев А.А., Вализер П.М.** (2006) Геология Ильменских гор. Геология и минералогия Иль-

меногорского комплекса: ситуация и проблемы. Миасс, ИГЗ УрО РАН, 3–20.

Ферштатер Г.Б. (1990) Эмпирический плагиоклаз-роговообманковый барометр. *Геохимия*, (3), 328.

Щекина Т.И., Граменицкий Е.Н., Юдинцев С.В. (1984) Экспериментальное изучение плавления миаскитов Ильменогорского массива. *Геохимия*, (10), 1443–1457.

Appleyard E.C. (1974) Syn-orogenic igneous alkaline rocks of eastern Ontario and northern Norway. *Lithos* (7), 147–169.

Blundy J.D., Holland T.J.B. (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. and Petrol.*, **104** (2), 208–224.

Hammarstrom J.M., Zen E.-An. (1986) Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *Amer. Miner.*, **71**(11/12), 1297–1313.

Hawthorne F.C., Oberti R., George E. G.E., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. (2012) Nomenclature of the amphibole supergroup. *Amer. Mineral*, **97**(11–12), 2031–2048.

Holland T., Blundy J. (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **116**, 433–447.

Jaques A.L., Blake D.H., Donchak P.J.T. (1982) Regional metamorphism in the Selwyn Range area, north-west Queensland. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, **7**(3), 181–196.

Schmidt M.W. (1991) Experimental calibration of the Al-in-hornblende geobarometer at 650 °C, 3.5–13.0 kbar. *Terra abstracts*, **3**(1), 30.

Spear F.S. (1981) Amphibole-plagioclase equilibria: a empirical model for the relation albite + tremolite = edenite + quartz. *Contrib. Mineral. and Petrol.*, **77**(4), 355–364.

Yardley W.D. (1991) An introduction to metamorphic petrology. London: Longman, Scientific & Technical, 248 p.

References

Appleyard E.C. (1974) Syn-orogenic igneous alkaline rocks of eastern Ontario and northern Norway. *Lithos* (7), 147–169.

Baneva N.N., Rusin A.I. (2014) [Structural-material evolution and isotopic age of the Ilmeno-Vishnevogorsk complex (Southern Urals)]. *Litosfera [Litosfera]*, (2), 131–137. (In Russian)

Bazhenov A.G., Bazhenova L.F., Krinova T.V., Khvorov P.V. (1999) [Potassic-ferri-sadanagaite (K,Na)Ca₂(Fe²⁺,Mg)₃(Fe³⁺,Al)₂[Si₅Al₃](OH)₂ – a new mineral species in the amphibole group (Ilmeny Mountains, Southern Urals)]. *Zapiski RMO [Proceedings of Russian Mineralogical Society]*, **128**(4), 50–55. (In Russian)

Bazhenov A.G., Bazhenova L.F., Polyakov V.O. (1998) [Sadanaite from alkaline complex of Ilmeny Mountains]. *Zapiski RMO [Proceedings of Russian Mineralogical Society]* **127**(1), 74–78. (In Russian)

Bazhenov A.G., Nedosekova I.L., Krinova T.V., Mironov A.B., Khvorov P.V. (2000) [Magnesio-fluoroarfvedsonite NaNa₂(Mg,Fe²⁺)₄Fe³⁺[Si₈O₂₂](F,OH)₂ – a new mineral species in the amphibole group (alkaline complex of Ilmeny–Vishnevye Mountains, South Urals)]. *Zapiski RMO [Proceedings of Russian Mineralogical Society]*, **129**(6), 2–35. (In Russian)

Bazhenov A.G., Muftakhov V.A. (2006) [Amphiboles of the Ilmenogorsky miaskite complex and its frame]. *Geokhimiya, petrologiya, mineralogiya i genesis shchelochnykh porod [Geochemistry, petrology, mineralogy and genesis of alkaline rocks]*. Miass, IMin UB RAS, 18–21. (In Russian)

Blundy J.D., Holland T.J.B. (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. and Petrol.*, **104** (2), 208–224.

Fershtater G.B. (1990) Empirical plagioclase-hornblende barometer. *Geokhimiya [Geochemistry]*, (3), 328. (In Russian)

Korinevsky E.V. (2015) [PetroExplorer – a system for creating geochemical information and analytical arrays in the process of case studies]. *Geoinformatika [Geoinformatics]*, (4), 48–53. (In Russian)

Krasnobaev A.A., Valizer P.M., Busharina S.V., Medvedeva E.V. (2016) [Zirconology of miaskites from the Ilmeny Mountains, South Urals]. *Geochemistry International* (9), 765–780.

Levin V.Ya. (1974) [Alkaline province of the Ilmeny-Vishnevye Mountains]. Moscow, Nauka, 221 p. (In Russian)

Levin V.Ya., Ronenson B.M., Samkov V.S., Levina I. A., Sergeev N. S., Kiselev I.P. (1997) Shchelochnokarbonatitovye komplekсы Urala [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Yekaterinburg, Uralsgeolkom, 274 p. (In Russian)

Makagonov E.P., Bazhenov A.G., Walzer N.I., Novokreshchenova L.B., Plokhikh N.I., Varlaikov A.S. (2003) [Deep structure of the Ilmenogorsky miaskite complex]. Miass, UrO RAN, 180 p. (In Russian)

Makagonov E.P., Mironov A.B. (2005) [Biotites of biotite miaskites of deep horizons of the Ilmenogorsky miaskite complex]. *Uralskiy mineralogicheskiy sbornik [Urals mineralogical collection]*, (13). Miass, IMin UB RAS, 34–42. (In Russian)

Makagonov P.E. (1999) [Feldspars of biotite miaskites of deep horizons of the Ilmenogorsky complex, Southern Urals]. *Uralskaya letnyaya mineralogicheskaya shkola-96 [Uralian Summer Mineralogical School-96]*. Yekaterinburg: UGGA, 240–242. (In Russian)

Medvedeva E.V. (2006) [Amphiboles of the Ilmenogorsky sequence: composition and interrelations]. *Uralskiy mineralogicheskiy sbornik [Urals mineralogical collection]*, (14). Miass, IMin UB RAS, 225–232. (In Russian)

Nedosekova I.L., Belyatsky B.V., Belousova E.A. (2016). [Trace elements and Hf isotope composition as indicators of zircon genesis due to the evolution of alkaline-

carbonatite magmatic system (Ilmeny-Vishnevogorsky complex, Urals, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 57(6), 891–906.

Nikandrov S.N., Kobyashev Yu.S., Valizer P.M. (2000) [Amphiboles of the Ilmenogorsky complex] Miass, IGZ RAS, 120 p. (In Russian)

Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticcheskie, metamorficheskie, metasomaticcheskie, impaktnye obrazovaniya (2008) [Petrographic code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, and impacted rocks]. 2008. St. Petersburg, VSEGEI, 200 p. (In Russian)

Plusnina L.P. (1983). [Experimental studies of metamorphism of mafic rocks]. M., Nauka, 159 p. (In Russian)

Rusin A.I., Krasnobaev A.A., Valizer P.M. (2006) [Geology of the Ilmeny Mountains]. *Geologiya and mineralogiya Ilmenogorskogo kompleksa: situatsiya i problemy* [Geology and mineralogy of the Ilmenogorsky complex: situation and problems], Miass, IGZ UB RAS, 3–20. (In Russian)

Shchekina T.I., Gramenitsky E.N., Yudintsev S.V. (1984) [Experimental study of melting of miaskites from the Ilmenogorsky complex]. *Geokhimiya*, (10), 1443–1457.

Valizer P.M., Kobyashev Yu.S., Nikandrov S.N. (2004) [Amphiboles of the Urals]. Miass, IGZ UB RAS, 139 p.

Voroshchuk D.V., Rusin A.I. (2003) [Reference geological section of the middle part of the Ilmenogorsk-Sysert polymetamorphic zone]. *Putevoditel geologichskoy ekskursii* [Guide of geological field trip]. Yekaterinburg, IGG UB RAS, 64–95. (In Russian)

Yardley W.D. (1991) An introduction to metamorphic petrology. London: Longman, Scientific & Technical, 248 p.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2018 г.