

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

БАРИЙСОДЕРЖАЩИЕ СЛЮДЫ РЯДА МУСКОВИТ—ГАНТЕРИТ ИЗ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД СРЕДНЕЗИМИНСКОГО ИЙОЛИТ-СИЕНИТ- КАРБОНАТИТОВОГО МАССИВА (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

© 2024 г. д. члены В. Б. Савельева^{1,*}, Б. С. Данилов^{1,**}, Е. П. Базарова^{1,***},
Е. А. Хромова^{2,****}, Ю. В. Данилова^{1,*****}

¹Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

²Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН,
ул. Сахьяновой, 6а, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: vsavel@crust.irk.ru

**e-mail: boris@crust.irk.ru

***e-mail: bazarova@crust.irk.ru

****e-mail: lena.khromova.00@mail.ru

*****e-mail: jdan@crust.irk.ru

Поступила в редакцию: 31.07.2023 г.

После доработки: 17.10.2023 г.

Принята к публикации: 27.12.2023 г.

Барийсодержащие слюды ряда мусковит—гантерит (содержание ВаО от 1.2 до 18.7 мас. %) обнаружены в гидротермально измененных ийолитах и щелочном сиените Среднезиминского ийолит-сиенит-карбонатитового массива (Восточная Сибирь). Они присутствуют в составе продуктов низкотемпературного замещения канкринита в ассоциации с натролитом, анальцитом, кальцитом, диаспором/бёмитом, целъзианом и стронцианитом. Эти слюды представлены зернами величиной до 1 мм, неоднородными по химическому составу. Количество Ва возрастает в краевых частях зерен, проявлено также послойное обогащение зерен слюды барием. Основным изоморфным замещением в мусковите является замещение по схеме $K^+ + Si^{4+} \leftrightarrow Ba^{2+} + IVAl^{3+}$. Эмпирическая формула наиболее богатых барием участков в одном из зерен имеет вид $(Ba_{0.54-0.56}Sr_{0-0.09}K_{0.46})_{\Sigma 1.02-1.06}Al_{1.98-2.01}(Si_{2.37-2.40}Al_{1.60-1.63})_{\Sigma 4.00}O_{10}(OH_{1.70-2.00}F_{0-0.30})_2$ и отвечает минеральному виду гантериту, однако в основном максимальное содержание ВаО в мусковите Среднезиминского массива составляет 14.0–14.9 мас. %, что соответствует 0.41–0.44 а.ф. Ва. Предполагается, что источником бария в гидротермальном растворе являлся ортоклаз, содержащий 0.5–0.9 мас. % ВаО, который претерпел альбитизацию на постмагматическом этапе. Широкое распространение в породах сульфидов указывает на низкую фугитивность кислорода, препятствующую образованию барита и благоприятную для образования Ва-содержащего мусковита и целъзиана.

Ключевые слова: Среднезиминский ийолит-сиенит-карбонатитовый массив, барийсодержащий мусковит, гантерит, целъзиан

DOI: 10.31857/S0869605524010077, **EDN:** GSVAGV

ВВЕДЕНИЕ

Барийсодержащий мусковит (эллахерит, зандбергит) (Минералы, 1992; Rieder et al., 1998) является сравнительно распространенной разновидностью этой слюды.

Главным образом он встречается в метаморфических горных породах (Dymek et al., 1983; Pan, Fleet, 1991; Tracy, 1991; Минералы, 1992; Grapes, 1993; Hetherington et al., 2003; Raith et al., 2014) и месторождениях сульфидных руд (Chabu, Boulègue, 1992; Юдовская, 1995; Jiang et al., 1996; Ильченко, Антонов, 2004), но обнаружен также в породах субдукционных меланжей (Harlow, 1995; Blanco-Quintero et al., 2011), эклогитах (Vocchio, 2007) и эксталяционных месторождениях Mn (Cotterell et al., 2019). Благоприятными для образования Ва-содержащего мусковита факторами являются: обогащенность барием осадочного протолита; присутствие в протолите или вмещающих породах барита или Ва-содержащих глинистых минералов, разлагавшихся при метаморфизме; гидротермальные флюиды, способные переносить барий; восстановительные условия, препятствующие образованию барита.

Количество ВаО в мусковите из метаморфических пород и сульфидных месторождений в основном не превышает 9–12 мас. %. В 2003 г. мусковитоподобная слюда с содержанием ВаО 17.0–17.2 мас. % из слюдистых сланцев и цоизит-цельзиановых гнейсов комплекса Берисал (Швейцария) была описана как новый минеральный вид с названием гантерит и идеальной формулой $\text{Ba}_{0.5}(\text{Na},\text{K})_{0.5}\text{Al}_2(\text{Si}_{2.5}\text{Al}_{1.5}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ (Graeser et al., 2003; Hetherington et al., 2003). Позже гантерит с содержанием ВаО 18.1 мас. % был обнаружен в дюмортьеритовой породе месторождения Линкольн-Хилл, Невада, США (Ma, Rossman, 2006). В отличие от слюды из комплекса Берисал слюда из месторождения Линкольн-Хилл содержит очень мало Na, и состав ее описывается идеальной формулой $(\text{Ba}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{Al}_2(\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.5})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Ma, Rossman, 2006).

Хотя первоначальная идеальная формула гантерита $\text{Ba}_{0.5}(\text{Na},\text{K})_{0.5}\text{Al}_2(\text{Si}_{2.5}\text{Al}_{1.5}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ до сих пор присутствует в минералогических базах данных (IMA List..., 2023), в настоящее время происходит отказ исследователей от нее в пользу представлений о гантерите как конечном бариевом члене твердого раствора $\text{KAl}_3(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$ – $\text{BaAl}_2(\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ (Green et al., 2019). В соответствии с правилом доминирующей валентности (Hatert, Burke, 2008) гантеритом следует называть слюду с идеализированным составом октаэдрической части Al_2 и преобладанием Ba^{2+} над суммой одновалентных катионов $\text{K}^+ + \text{Na}^+$.

В магматических породах находки богатого барием мусковита крайне редки. В кратком сообщении (Макагонов, Котляров, 2007) упоминается о присутствии барийсодержащего мусковита с эмпирической формулой $(\text{K}_{0.64}\text{Ba}_{0.33}\text{Na}_{0.05})_{1.02}(\text{Al}_{1.89}\text{Mg}_{0.08}\text{Fe}_{0.03})_{2.00}(\text{Al}_{1.19}\text{Si}_{2.81}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ совместно с натролитом среди зерен нефелина и альбита в биотитовом пегматите Ильменогорского миаскитового массива, Южный Урал. Кроме этого, мусковит с содержанием ВаО до 8.4 мас. % обнаружен в трондьемитах и пегматитах из субдукционных меланжей Восточной Кубы (Blanco-Quintero et al., 2011).

Нами мусковит с содержанием ВаО от 1.2 до 18.7 мас. % диагностирован в гидротермально измененных щелочных породах позднерифейского Среднезиминского ийолит-сиенит-карбонатитового массива. Редкость богатого барием мусковита в магматических породах свидетельствует о необычных условиях, в которых происходит кристаллизация этой слюды. В том числе с целью использования Ва-содержащего мусковита как индикатора физико-химической обстановки минералообразования, в настоящей работе рассмотрен химический состав этой слюды, ее минеральные ассоциации и причины кристаллизации в породах Среднезиминского щелочного массива.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Среднезиминский ийолит-сиенит-карбонатитовый массив расположен в Восточной Сибири (Иркутская область), в пределах Урикско-Ийского грабена на юго-западной окраине Сибирского кратона (рис. 1, а). Наряду с Белозиминским и Большетаг-

нинским массивами ультраосновных щелочных пород и карбонатитов, он относится к Восточно-Саянской щелочной провинции, выделяемой в зоне сочленения Сибирского кратона с Алтае-Саянской складчатой областью (Андреева и др., 1984). Возраст щелочных пород зиминского комплекса составляет около 645 млн лет (Doroshkevich et al., 2016; Salnikova et al., 2019).

Среднезиминский массив прорывает дислоцированную толщу раннепротерозойских песчаников и сланцев, выполняющих Урикско-Ийский грабен. Массив имеет линзовидную в плане форму, площадь 2.6 км² и вытянут в северо-западном направлении вдоль контролирующего его разлома (Фролов и др., 2003) (рис. 1, б). Вмещающие породы на контакте с массивом фенитизированы. Согласно (Фролов и др., 2003) становление массива происходило в малоглубинных условиях в виде последовательных инъекций расплавов в трещинные и линзовидные полости. Широкое распространение незамещенных останцов кровли среди пород массива указывает на малый эрозионный срез.

Породы раннего магматического этапа представлены пироксенитами, сохранившимися в виде реликтов среди карбонатитов. Второй этап характеризуется кристаллизацией ийолитов и мельтейгитов в виде даек и линзовидных тел. В третий этап внедрялись нефелиновые сиениты, среди которых выделяются биотитовые, эгириновые и биотит-эгириновые разновидности, альбитизированные и канкринитизированные. С четвертым этапом связано образование лейкократовых биотитовых субщелочных сиенитов. В завершающий этап произошло образование карбонатитов: биотит-кальцитовых, эгирин-кальцитовых, эгирин-биотит-кальцитовых, амфибол-кальцитовых и анкерит-доломитовых. С карбонатитами связана пирохлоровая, апатитовая, цирконовая и другая минерализация.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор образцов главных разновидностей пород, слагающих Среднезиминский массив, производился из керна скважин. Химический состав минералов изучен на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss, Германия) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобритания) в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Определение содержания Ba в породах выполнено в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск) методом рентгенофлуоресцентного анализа (аналитик Е.В. Худогова).

Спектры комбинационного рассеяния света получены с использованием конфокальной микроскопической системы WITec Alpha 300R (WITec GmbH, Германия) в ЦКП «Геодинамика и геохронология». Источник возбуждающего излучения — твердотельный Nd:YAG-лазер с удвоенной частотой ($\lambda = 532$ нм) и переменной выходной мощностью. Спектры записывались при комнатной температуре на спектрометре UHTS300 с дифракционной решеткой 1800 штрихов/мм. В качестве стандарта использовался кристаллический кремний.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Барийсодержащий мусковит обнаружен в образцах гидротермально измененных ийолитов и сиенита. Ийолиты (обр. 33/21 и 161/21) сложены клинопироксенами (50–60%), кальцитом (20–25%), канкринитом и продуктами его изменения (10–20%), биотитом (7–10%), калиевым полевым шпатом (до 10%), Ti-содержащим андрадитом (5–7%), апатитом. Ранняя генерация клинопироксена образована крупными зернами диопсида $\text{Di}_{58-72}\text{Hd}_{23-35}\text{Aeg}_{3-16}$, содержащими во включениях кальцит, магнетит, титанит, сфалерит и ассоциирующими с биотитом (X_{Mg} 0.52–0.63). Поздняя генерация клинопироксена представлена мелкими зернами эгирина $\text{Aeg}_{79}\text{Di}_{11-18}\text{Hd}_{3-10}$, замещающими

диопсид и ассоциирующими с титанитом, аннитом (X_{Mg} 0.27–0.31), магнетитом, бадделейтом. Участки среди диопсида сложены кальцитом, канкринитом и продуктами его замещения — натролитом, анальцитом, диаспором/бёмитом, альбитом, мусковитом, целсианом, среди которых отмечаются стронцианит и пирит. Нефелин (Ne_{82}) отмечен в реликтах среди канкринита. Продуктами низкотемпературного изменения диопсида, биотита и граната являются железистый хлорит, магнетит, ильменит, бадделейт, циркон и рутил.

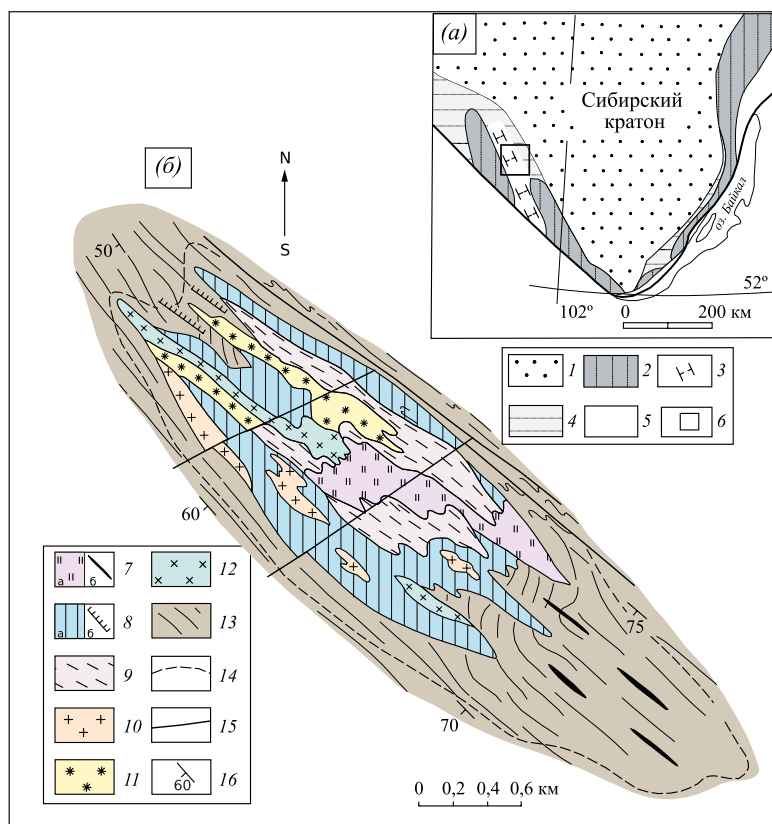


Рис. 1. Схемы расположения (а) и геологического строения (б) Среднезиминского массива по (Фролов и др., 2003). На рис. а: 1 — фанерозойский осадочный чехол Сибирского кратона; 2 — раннедокембрийские выступы фундамента Сибирского кратона; 3 — палеопротерозойский Урикско-Ийский грабен; 4 — отложения неопротерозойской окраины кратона; 5 — Центрально-Азиатский складчатый пояс; 6 — район расположения Среднезиминского массива; на рис. б: 7 — анкеритовые и доломитовые карбонатиты (а — зоны, б — жилы); 8 — эгирин-биотит-кальцитовые карбонатиты (а — зоны, б — жилы); 9 — биотит-кальцитовые карбонатиты; 10 — субщелочные сиениты; 11 — нефелиновые сиениты; 12 — мельтейгиты и ийолиты; 13 — кварцево-сланцевые сланцы; 14 — ореол фенитизации сланцев; 15 — разрывные нарушения; 16 — элементы залегания сланцеватости — слоистости.

Fig. 1. Location (a) and the geological scheme (b) of the Sredneziminsky massif (after Frolov et al., 2003). In fig. a: 1 — Phanerozoic sedimentary cover of the Siberian craton; 2 — Early Precambrian basement protrusions of the Siberian craton; 3 — Paleoproterozoic Urik-Iya graben; (4) deposits of the Neoproterozoic margin of the craton; 5 — Central Asian folded belt; 6 — region of location of the Sredneziminsky massif; in fig. b: 7 — ankerite and dolomitic carbonatites (a — zones, b — veins); 8 — aegirine-biotite-calcite carbonatites (a — zones, b — veins); 9 — biotite-calcite carbonatites; 10 — subalkaline syenites; 11 — nepheline syenites; 12 — melteigites and ijolites; 13 — quartz-micaceous shales; 14 — zone of fenitization of shales; 15 — discontinuous violations; 16 — elements of occurrence of schistosity-layering.

Сиенит (обр. 173/21) представляет собой породу, на 70–75% сложенную зернами ортоклаза. Промежутки между ними выполнены анальцимом, мусковитом и кальцитом, вероятно заместившими канкринит (15–20%), альбитом (7–10%), частично хлоритизированным аннитом (X_{Mg} 0.29–0.36) (5–7%), кальцитом (1–2%) и эгирином (около 1%). Калиевый полевой шпат содержит примеси Na_2O 0.34–0.97 мас. %, BaO 0.51–0.92 мас. % и замещается альбитом. Акцессорные минералы представлены цирконом, пироксеном, апатитом, магнетитом, пиритом, Mn-содержащим ильменитом. В калиевом полевоом шпате и кальците отмечены включения норсетита $\text{BaMg}(\text{CO}_3)_2$ и минеральной фазы состава $\text{BaCa}(\text{CO}_3)_2$.

АССОЦИАЦИИ БАРИЕВЫХ МИНЕРАЛОВ

Барийсодержащий мусковит представлен зернами величиной от менее 0.01 до 0.3 мм в образцах ийолита 33/21 и сиенита 173/21 и величиной до 1 мм в образце ийолита 161/21. В образце ийолита 33/21 зерна Ba-содержащего мусковита ассоциируют с анальцимом, реже натролитом (табл. 1), диаспором/бёмитом, альбитом, кальцитом, стронцианитом (рис. 2, а–в). Содержание Ba возрастает в краевых зонах зерен слюды, что на BSE-изображениях проявляется в виде светлых участков или ка-

Таблица 1. Химический состав (мас. %) натролита и анальцима из щелочных пород Среднезиминского массива

Table 1. Chemical composition (wt %) of natrolite and analcime from alkaline rocks of the Sredneziminsky massif

Компонент	1	2	3	4
SiO_2	45.03	51.49	53.87	54.38
Al_2O_3	27.11	23.77	22.60	23.13
Fe_2O_3		0.44		
CaO	0.39	0.78		
SrO		1.49		
Na_2O	15.78	12.10	13.59	13.51
K_2O		0.28	1.26	
Сумма	88.31	90.36	91.32	91.02
Расчет*	O=10	O=6	O=6	O=6
Коэффициенты в формулах				
Si	2.93	1.94	2.00	2.00
Al	2.08	1.06	0.99	1.00
Fe^{3+}		0.01		
Ca	0.03	0.03		
Sr		0.03		
Na	1.99	0.88	0.98	0.97
K		0.01	0.06	

Примечание. 1 — натролит из ийолита; 2–4 — анальцим из ийолитов (ан. 2, 3) и сиенита (ан. 4). Fe_2O_3 — расчетное. Расчет* — количества атомов кислорода, на которые рассчитаны формулы минералов.

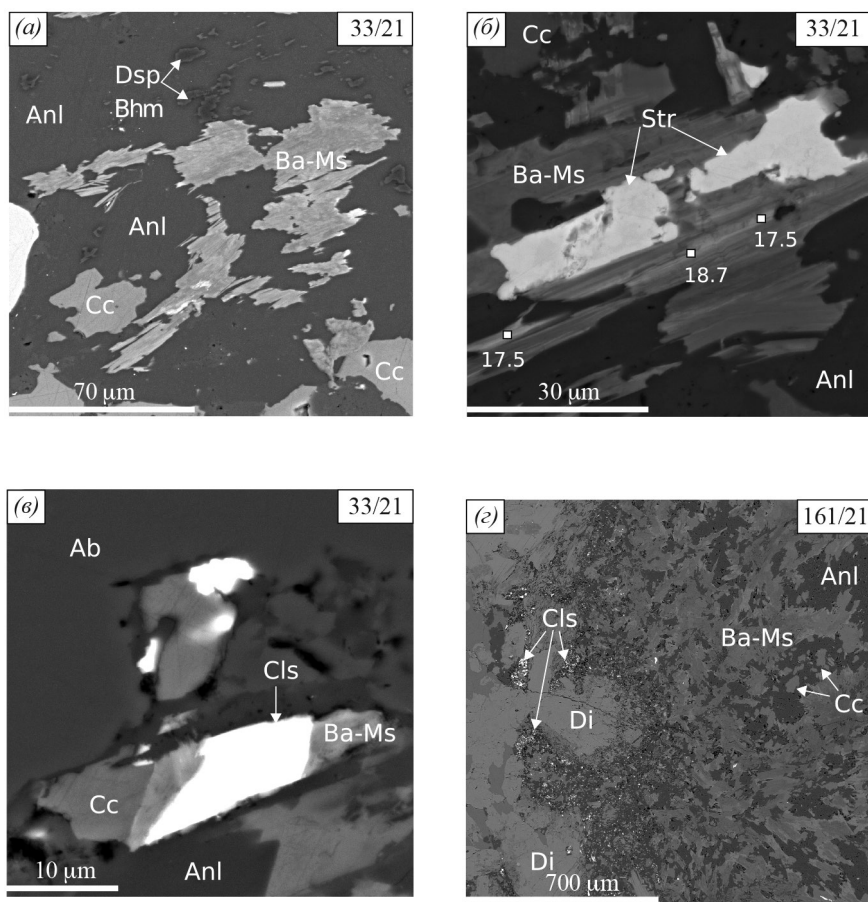


Рис. 2. Взаимоотношения минералов в ийолитах.

a — зерна Ва-содержащего мусковита, обогащенные Ва по краям (светлые участки) в ассоциации с анальцимом, диаспором/бёмитом и кальцитом; *б* — послойное обогащение Ва в мусковите, числа — содержание BaO, мас. %; *в* — целъзиан в ассоциации с Ва-содержащим мусковитом; *г* — слюдяно-анальцимовое обособление среди диопсида; целъзиан присутствует в краевой зоне; *д* — зональные зерна богатого Ва мусковита в центре лейкократового обособления среди диопсида; *е* — целъзиан в ассоциации с анальцимом и кальцитом среди диопсида и биотита. Символы минералов здесь и на рис. 3, 6 и 7: Ab — альбит, Acel — алюиноселадонит, Anl — анальцим, Ba-cel — барийсодержащий селадонит, Ba-Ms — барийсодержащий мусковит, Bhm — бёмит, Brt — барит, Bt — биотит, Cc — кальцит, Cls — целъзиан, Di — диопсид, Dsp — диаспор, Gtr — гантерит, Kfs — калиевый полевой шпат, Ms — мусковит, Ntr — натролит, Or — ортоклаз, Str — стронцианит.

Fig. 2. Relationships between minerals in ijolites.

a — grains of Ba-bearing muscovite, enriched in Ba along the edges (light areas) in association with analcime, diaspore/böhmite and calcite; *б* — layer-by-layer enrichment of Ba in muscovite, numbers show the content of BaO, wt %; *в* — celtsian in association with Ba-bearing muscovite; *г* — mica-analcime segregation among diopside; celtsian is present in the marginal zone; *д* — zoned grains of rich Ba muscovite in the center of leucocratic segregation among diopside; *е* — celsian in association with analcime and calcite among diopside and biotite. Mineral symbols here and in Fig. 3, 6 and 7: Ab — albite, Acel — aluminoceladonite, Anl — analcime, Ba-cel — barium-bearing celadonite, Ba-Ms — barium-bearing muscovite, Bhm — böhmite, Brt — barite, Bt — biotite, Cc — calcite, Cls — celsian, Di — diopside, Dsp — diaspore, Gtr — ganterite, Kfs — potassium feldspar, Ms — muscovite, Ntr — natrolite, Or — orthoclase, Str — strontianite.

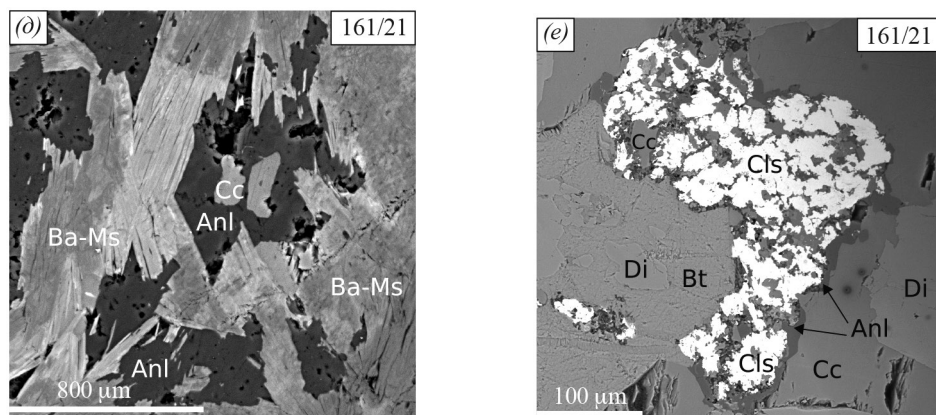


Рис. 2. Взаимоотношения минералов в ийолитах (продолжение).

Fig. 2. Relationships between minerals in ijolites.

евок (рис. 2, а); наблюдается также послойное обогащение зерен мусковита барием (рис. 2, б). Изредка в породе отмечается целъзиан как вторичный минерал по канкриниту в ассоциации с Ва-содержащим мусковитом (рис. 2, в).

В образце ийолита 161/21 срastания Ва-содержащего мусковита с анальцимом (табл. 1) и кальцитом слагают лейкократовые обособления размером до (5–7) — (10–12) мм среди диопсида, являющиеся, вероятно, продуктом замещения канкринита. Центральная часть обособлений сложена вышеописанной ассоциацией, а в краевой зоне, на контакте с диопсидом, к ней добавляется целъзиан (рис. 2, в). В промежутках между зернами диопсида наблюдаются скопления целъзиана с анальцимом и кальцитом (рис. 2, е), иногда в них присутствует в небольшом количестве Ва-содержащий мусковит. В зернах слюды на BSE-изображениях проявлена зональность в виде светлых каевок, характеризующихся высоким содержанием Ва (рис. 2, д).

В образце сиенита 173/21 Ва-содержащий мусковит в ассоциации с анальцимом (табл. 1), кальцитом, цирконом, пироксеном находится в промежутках между зернами калиевого полевого шпата. Зональность в зернах слюды здесь не выражена. Целъзиан в этом образце не отмечен.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВА-СОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ

Химический состав слюд из образцов гидротермально измененных ийолитов был изучен в 70 точках, из образца сиенита — в 3 точках. Представительные анализы приведены в табл. 2.

Количество бария только в одном анализе мусковита оказалось ниже предела обнаружения, тогда как в остальных анализах содержание ВаО изменяется от 1.21 до 18.72 мас. %, что соответствует 0.03–0.56 атома на формулу (а.ф.) Ва. Содержание Na приблизительно в 80% анализов ниже предела обнаружения, а в 20% анализов составляет 0.3–1.4 мас. %, или 0.04–0.20 а.ф. Na. В одном анализе присутствует SrO в количестве 2.0 мас. %, или 0.09 а.ф. Sr.

Содержание SiO_2 в анализах слюды варьирует от 29.9 до 44.6 мас. %, что соответствует 2.37–3.00 а.ф. Si. Количество Al_2O_3 колеблется от 35.9 до 40.3 мас. %, что соответствует 2.89–3.34 а.ф. Al; при этом на ^{IV}Al приходится 1.00–1.63 а.ф., а на ^{VI}Al — 1.88–2.01 а.ф.

[illegible]

Отрицательная корреляция между ^{VI}Al и $\text{Mg}+\text{Fe}$, также проявленная в Ва-содержащем мусковите (рис. 3, *e*), отражает изоморфное замещение по схеме $^{VI}\text{Al}^{3+} + ^{IV}\text{Al}^{3+} \leftrightarrow (\text{Mg}, \text{Fe})^{2+} + \text{Si}^{4+}$, т.е. мусковит $\text{KAl}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \leftrightarrow$ алуминоселадонит $\text{KAl}(\text{Fe}^{2+},$

Компо- нент	15	16 Ц	17 Кр	18 Ц	19 Кр	20 Ц	21 Кр	22 Ц	23 Кр	24 Ц	25 Кр	26 Ц	27 Кр
SiO ₂	34.66	44.03	38.12	43.45	37.48	42.34	37.37	44.58	39.36	43.34	37.74	43.69	39.58
Al ₂ O ₃	38.17	38.90	37.51	37.79	39.36	39.17	39.55	37.13	39.00	38.04	40.30	37.66	38.77
FeO		0.35	0.82	0.72		0.50		0.53	0.36	0.67		0.59	0.45
MgO		0.38		0.36									0.40
SrO													
BaO	17.54	1.27	7.32	2.58	11.30	3.43	11.42	2.21	8.94	2.42	11.27	2.14	8.72
Na ₂ O	1.36					0.40							
K ₂ O	3.64	12.19	9.49	11.66	8.14	11.64	8.55	11.28	9.55	12.06	8.50	11.82	8.37
F													1.35
-O=F ₂													0.57
Сумма	95.37	97.12	93.26	96.57	96.28	97.48	96.89	95.73	97.21	96.53	97.81	95.90	97.07

[illegible]

Mg)(Si₄)O₁₀(OH)₂. Однако это замещение проявлено ограничено, на долю алюмоноселадонитового минала в составе Ва-содержащего мусковита приходится не более 7 мол. %.

При обсуждении схем изоморфизма в богатом барием мусковите Д. Грин с соавторами (Green et al., 2019) указывают также на возможное изоморфное замещение по схеме $K^+ + {}^{VI}Al^{3+} \leftrightarrow Ba^{2+} + (Mg, Fe)^2$, т.е. мусковит $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2 \leftrightarrow$ бариевый селадонит с гипотетическим составом $BaAl(Mg, Fe)^{2+}(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$. Замещение по этой схеме можно предполагать в слюде из образца ийолита 161/21 (рис. 3, д, е).

Химический состав богатой барием слюды из щелочных пород Среднезиминского массива указывает на ее преимущественную принадлежность к бинарному твердому раствору мусковит – гантерит (Ma, Rossman, 2006) (рис. 4). В то же время отмечаемый

Таблица 2. Окончание

Компонент	28 Ц	29 Кр	30	31	32	33	34
SiO ₂	43.24	40.86	43.84	35.33	40.2	42.44	39.75
Al ₂ O ₃	37.00	37.47	35.94	38.43	38.02	37.47	38.00
FeO	0.76	0.71	1.11	0.64	0.55	0.51	0.41
MgO			1.11				
SrO							
BaO	1.52	4.58	2.21	12.63	6.06	2.07	6.62
Na ₂ O			0.66	1.16	0.34	0.40	
K ₂ O	12.18	10.54	9.24	6.80	9.72	11.44	10.06
F							
-O=F ₂							
Сумма	94.70	94.16	94.11	94.99	94.89	94.33	94.84
Коэффициенты в формулах (расчет на 22 заряда)							
Si	2.96	2.86	2.99	2.60	2.82	2.92	2.80
^{IV} Al	1.04	1.14	1.01	1.40	1.18	1.08	1.20
^{VI} Al	1.94	1.95	1.88	1.93	1.96	1.95	1.96
Fe ²⁺	0.04	0.04	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02
Mg			0.11				
Sr							
Ba	0.04	0.13	0.06	0.36	0.17	0.06	0.18
Na			0.09	0.17	0.05	0.05	
K	1.06	0.94	0.80	0.64	0.87	1.00	0.90
F							

Примечание. 1–31 — слюда из ийолитов (1–15 — обр. 33/21; 16–31 — обр. 161/21), 32–34 — слюда из сиенита (обр. 173/21). Ц — центр зерна, Кр — край зерна.

Таблица 3. Матрица коэффициентов корреляции между главными компонентами Ва-содержащих слюд из ийолитов Среднезиминского массива**Table 3.** Correlation matrix between the main components of Ba-bearing micas from ijolites of the Sredneziminsky massif

Компо- ненты	Si	Al	Fe	Mg	Ba	Na	K	^{IV} Al	^{VI} Al	K+Na	Fe+Mg
Si	1.000										
Al	-0.989	1.000									
Fe	0.562	-0.643	1.000								
Mg	0.216	-0.307	0.382	1.000							
Ba	-0.970	0.950	-0.561	-0.191	1.000						
Na	-0.168	0.130	-0.120	0.042	0.226	1.000					
K	0.905	-0.876	0.519	0.050	-0.961	-0.392	1.000				
^{IV} Al	-1.000	0.989	-0.562	-0.216	0.970	0.168	-0.905	1.000			
^{VI} Al	-0.494	0.616	-0.796	-0.661	0.424	-0.130	-0.332	0.494	1.000		
K+Na	0.928	-0.906	0.525	0.065	-0.971	-0.153	0.969	-0.928	-0.391	1.000	
Fe+Mg	0.461	-0.565	0.819	0.843	-0.445	-0.044	0.333	-0.461	-0.873	0.346	1.000

Примечание. Расчет выполнен для выборки из 69 анализов Ва-содержащего мусковита из двух образцов гидротермально измененных ийолитов. $r_{\text{крит}} = 0.333$, $\alpha = 0.01$.

в некоторых анализах рост содержания Na одновременно с ростом содержания Ва указывает на то, что она участвует также в тройном твердом растворе, включающем парагонит (Graeser et al., 2003). Доля парагонитового минала достигает 16 мол. %. Тем не менее в целом по химическому составу Ва-содержащий мусковит из пород Среднезиминского массива ближе к Ва-содержащему мусковиту из месторождения Линкольн-Хилл, чем из комплекса Берисал (рис. 4). Как и слюда из месторождения Линкольн-Хилл, Ва-содержащий мусковит из щелочных пород Среднезиминского массива содержит очень мало примесей (табл. 2, 4). В этом его отличие от богатого Ва мусковита из метаморфических пород и сульфидных месторождений, содержащих в значительном количестве Ti, Cr, Fe, Mg, Zn и др. (Dymek et al., 1983; Pan, Fleet, 1991; Chabu, Boulègue, 1992; Jiang et al., 1996 и др.). В то же время в анализах богатого Ва мусковита из щелочных пород Среднезиминского массива отмечаются F и Sr, которые не обнаружены в мусковите из месторождения Линкольн-Хилл (Ma, Rossman, 2006).

Цельзиан из ийолитов имеет довольно однородный состав (табл. 5). На долю цельзианового компонента в минерале приходится 76–94 мол. %, ортоклазового — 4–11 мол. %, альбитового 0–10 мол. %, анортитового 0–3 мол. % и слаусонитового 0–6 мол. %.

СПЕКТРОСКОПИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Спектры комбинационного рассеяния (КР) света получены на участках тонких срезов образцов ийолитов 33/21 и 161/21, где ранее методом энергодисперсионного микроанализа были выявлены скопления мелкочешуйчатого Ва-содержащего мусковита. Полученные КР-спектры слюды приведены на рис. 5. В подавляющем большинстве случаев богатая барием слюда имеет те же спектральные характеристики, что и мусковит, КР-спектры которого содержатся в базе данных RRUFF (Lafuente et al.,

Таблица 4. Химический состав (мас. %) гантерита из комплекса Берисал и месторождения Линкольн-Хилл**Table 4.** Chemical composition (wt %) of ganterite from the Berisal complex and Lincoln Hill deposit

Компонент	1	2
SiO ₂	35.01	33.53
TiO ₂	0.34	0.14
Al ₂ O ₃	37.55	40.20
FeO	1.26	0.06
MnO	0.04	0.04
MgO	0.76	0.01
CaO	0.01	0.04
BaO	17.04	18.12
Na ₂ O	1.61	0.36
K ₂ O	2.57	3.91
Сумма	96.20	96.42
Коэффициенты в формулах (расчет на 22 заряда)		
Si	2.58	2.49
Ti	0.02	0.01
^{IV} Al	1.42	1.51
^{VI} Al	1.85	2.00
Fe ²⁺	0.08	0.00
Mn	0.00	0.00
Mg	0.08	0.00
Ca	0.00	0.00
Ba	0.49	0.53
Na	0.23	0.05
K	0.24	0.37

Примечание. 1 — слюдяной сланец комплекса Берисал, Швейцария (Graeser et al., 2003: табл. 6, ан. 2); 2 — дюмортьеритовая порода месторождения Линкольн-Хилл, Невада, США (Ma, Rossman, 2006: табл. 1, ан. 1).

2015) (рис. 5, а). Это согласуется с результатами, полученными Ч. Ма и Дж.Р. Россманом (Ma, Rossman, 2006) при изучении барийсодержащего мусковита из месторождения Линкольн-Хилл. Однако небольшое количество полученных нами спектров существенно отличались от обычного мусковита (рис. 5, б) и напоминали спектры гантерита комплекса Берисал (рис. 5, в) (Graeser et al., 2003). Нами не проводились структурные исследования, поэтому причина различия в КР-спектрах остается неясной. При обсуждении причин различий КР-спектров гантерита из месторождения Линкольн-Хилл и комплекса Берисал Ч. Ма и Дж.Р. Россман предполагают, что гантерит комплекса Берисал с фенгитовым замещением и значительным парагонитовым

Таблица 5. Химический состав (мас. %) цельзиана из ийолитов Среднезиминского массива
Table 5. Chemical composition (wt %) of celsian from ijolites of the Sredneziminsky massif

Компонент	1	2	3	4
SiO ₂	35.90	31.45	32.97	32.77
Al ₂ O ₃	25.87	26.25	25.55	25.81
Fe ₂ O ₃	0.44			
CaO	0.46		0.34	
SrO		2.00		
BaO	34.03	39.33	40.46	42.29
Na ₂ O	0.90			
K ₂ O	1.51	0.47	1.07	0.77
Сумма	99.11	99.50	100.39	101.64
Коэффициенты в формулах (O=8)				
Si	2.15	1.99	2.06	2.04
Al	1.82	1.96	1.88	1.90
Fe ³⁺	0.02			
Ca	0.03		0.02	
Sr		0.07		
Ba	0.80	0.98	0.99	1.03
Na	0.10			
K	0.12	0.04	0.09	0.06
X _{Ba}	0.76	0.90	0.90	0.94

Примечание. 1, 2 — обр. 33/21, 3, 4 — обр. 161/21. $X_{Ba} = Ba/(Ba + K + Na + Sr + Ca)$.

компонентом имеет структуру, отличную от чистого мусковита (Ma, Rossman, 2006). Изучение структуры Ba-содержащего мусковита из комплекса Берисал (Armbruster et al., 2002) показало, что он имеет меньший объем элементарной ячейки, чем идеальный мусковит, из-за высокого содержания парагонитовой молекулы (концентрация Na 0.13–0.20 а.ф.). Установлено также (Brigatti et al., 1998), что замена ^{VI}Al на Mg, Fe и Ti в мусковите-2M₁ приводит к увеличению толщины октаэдрического слоя, к меньшему отклонению тетраэдрического кольца от гексагональной симметрии и менее выраженному гофрированию базальных атомов О. Можно предположить, что отдельные зерна или участки зерен мусковита из ийолитов Среднезиминского массива, в которых проявлено значительное парагонитовое или фенгитовое замещение, также обнаруживают структурные изменения, которые выражаются в КР-спектрах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдаемая в щелочных породах Среднезиминского массива ассоциация Ba-содержащего мусковита и цельзиана с натролитом и анальцимом, замещающими канкринит, указывает на их образование на поздних стадиях постмагматического этапа при участии гидротермальных растворов. Доля парагонитового компонента в

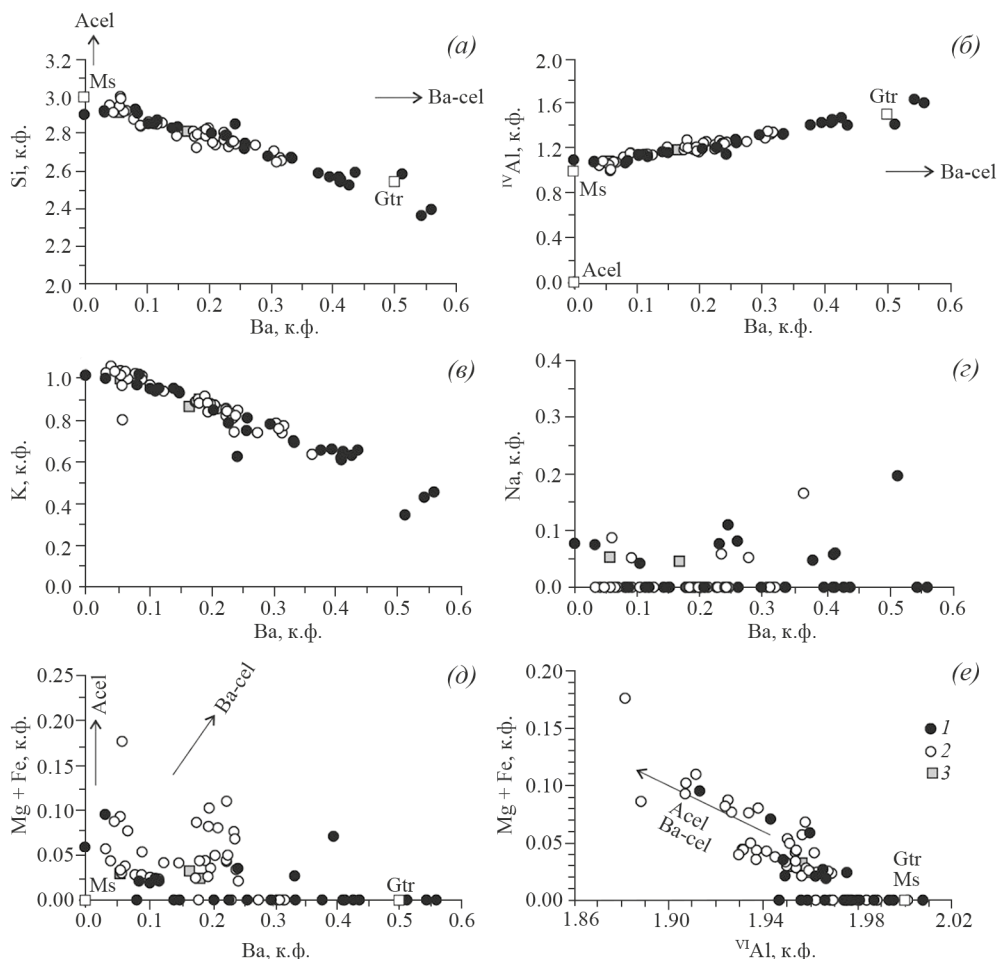


Рис. 3. Соотношения Si–Ba (а), ^{IV}Al –Ba (б), K–Ba (в), Na–Ba (г), (Mg+Fe)–Ba (д) и (Mg+Fe)– ^{VI}Al (е), к.ф., в слюдах из щелочных пород Среднезиминского массива. 1, 2 — слюды из ийолитов (1 — обр. 33/21, 2 — обр. 161/21), 3 — слюды из сиенита (обр. 173/21).

Fig. 3. Si vs. Ba (a), ^{IV}Al vs. Ba (b), K vs. Ba (v), Na vs. Ba (g), (Mg+Fe)– vs. Ba (d) and (Mg+Fe) vs. ^{VI}Al (e) plots (*apfu*) in micas from alkaline rocks of the Sredneziminsky massif. 1, 2 — mica from ijolites (1 — sample 33/21, 2 — sample 161/21), 3 — mica from syenite (sample 173/21).

мусковите с наиболее низким содержанием Ва составляет 5–8 мол. %, что позволяет по мусковит-парагонитовому термометру оценить верхний температурный предел кристаллизации мусковита значениями 350–400 °C (Дир и др., 1966). Зональность, наблюдаемая в мусковите, отражает увеличение концентрации ионов Ba^{2+} в растворе в процессе его взаимодействия с породой. Источником калия, необходимого для образования мусковита, вероятно, являлись ортоклаз, замещавшийся альбитом, и нефелин, замещавшийся канкринитом, на более высокотемпературной стадии постмагматического изменения.

Бариевый мусковит обнаружен нами только в трех из десяти детально изученных образцов силикатных щелочных пород массива. В остальных образцах мусковит либо

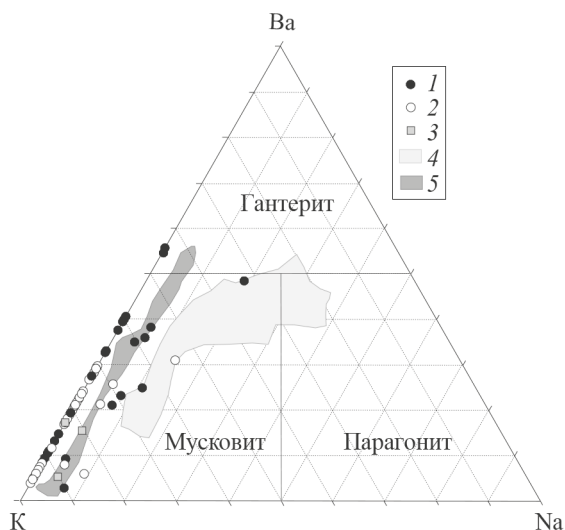


Рис. 4. Диаграмма К-Ва-На для слюд системы мусковит – парогонит – гантерит. Поля конечных членов твердого раствора $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 - \text{NaAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 - \text{BaAl}_2(\text{Si}_2\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ показаны в соответствии с правилом доминирующей валентности (Hatert, Burke, 2008). Слюда: 1, 2 — из ийолитов Среднезиминского массива (1 — обр. 33/21, 2 — обр. 161/21); 3 — из сиенита Среднезиминского массива (обр. 173/21), 4, 5 — поля состава слюды из слюдистых сланцев и цоизит-цельзиановых гнейсов комплекса Берисал, Швейцария (Graeser et al., 2003) (4) и дюмортьеритовой породы месторождения Линкольн-Хилл, Невада, США (Ma, Rossman, 2006) (5).

Fig. 4. K-Ba-Na diagram for micas of the muscovite-paragonite-ganterite system. The fields of end members of the solid solution $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 - \text{NaAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 - \text{BaAl}_2(\text{Si}_2\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ are shown in accordance with the dominant valence rule (Hatert, Burke, 2008). Micas: 1, 2 — from ijolites of the Sredneziminsky massif (1 — sample 33/21, 2 — sample 161/21); 3 — from syenite of the Sredneziminsky massif (sample 173/21), 4, 5 — fields of mica composition from mica schists and zoisite-celsian gneisses of the Berisal complex, Switzerland (Graeser et al., 2003) (4) and dumortierite rock of the Lincoln deposit Hill, Nevada, USA (Ma, Rossman, 2006) (5).

отсутствовал, либо содержание бария в мусковите было ниже предела обнаружения. Это указывает на то, что повышенная концентрация Ва в поровых растворах возникла лишь на локальных участках массива. Можно предполагать, что увеличение концентрации Ва в поровом растворе могло быть обусловлено разложением или замещением ранее образованных Ва-содержащих минералов. На высокую подвижность Ва на постмагматическом этапе указывают широкие вариации его содержания в ийолитах и сиенитах, несущих признаки гидротермального изменения. Содержание Ва составляет в ийолитах-мельтейгитах 180–6300 ppm (в среднем 1816 ppm по 5 пробам), в сиенитах 110–5300 ppm (в среднем 1507 ppm по 9 пробам). Источником бария в гидротермальных растворах мог быть прежде всего калиевый полевой шпат, который на высокотемпературной стадии постмагматического этапа претерпел интенсивную альбитизацию. Так, в одном из образцов сиенита наблюдалось сильное обогащение калиевого полевого шпата барием на фронте замещения альбитом (рис. 6). При благоприятных тектонических условиях, создававших пути для миграции постмагматических флюидов в закристаллизовавшемся массиве, растворы, содержащие Ва, могли перераспределять его на пути своего движения. Кроме того, причиной локального увеличения концентрации ионов Ba^{2+} в поровых растворах могло быть разложение

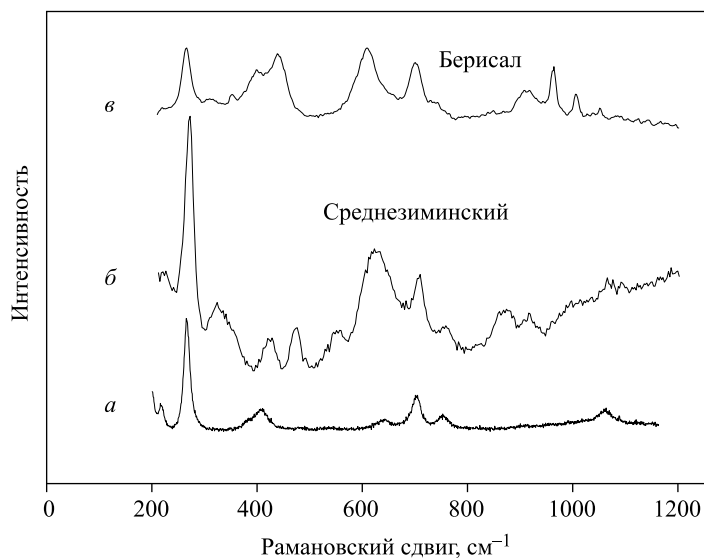


Рис. 5. КР-спектры барийсодержащих слюд.

a, б — Ba-содержащий мусковит из ийолитов Среднезиминского массива; *в* — гантерит комплекса Берисал, Швейцария (Graeser et al., 2003).

Fig. 5. Raman spectra of barium-bearing micas.

a, б — Ba-bearing muscovite from ijolites of the Sredneziminsky massif; *в* — ganterite from the Berisal complex, Switzerland (Graeser et al., 2003).

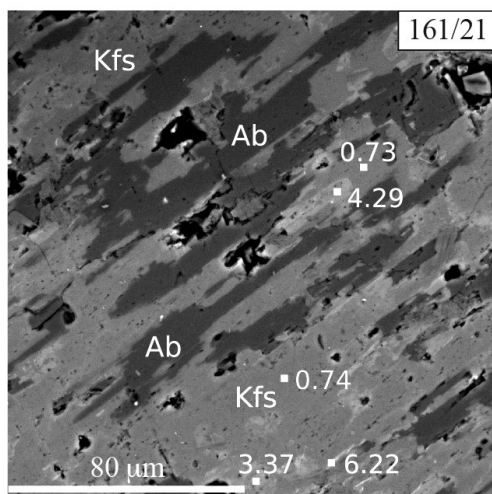


Рис. 6. Перераспределение Ba при замещении ортоклаза альбитом в канкринитовом сиените. Числа — содержание BaO (мас. %) в калиевом полевоом шпате.

Fig. 6. Ba redistribution upon replacement of orthoclase by albite in cancrinite syenite. The numbers show the content of BaO (wt %) in potassium feldspar.

карбонатов Ва, присутствующих в силикатных щелочных породах в виде включений в кальците и калиевом полевом шпате.

С учетом минерального состава гидротермально измененных щелочных пород Среднезиминского массива нами построена диаграмма $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}$, показывающая взаимоотношения Ва-содержащего мусковита с цельзианом (рис. 7). При низкой активности ионов Ba^{2+} в гидротермальном растворе возникает парагенезис мусковита с анальцимом/натролитом и диаспором/бёмитом. Со временем концентрация ионов Ba^{2+} в растворе возрастает, что приводит к кристаллизации Ва-содержащего мусковита с постепенно увеличивающимся в нем содержанием бария. При высокой активности ионов Ba^{2+} устойчив парагенезис цельзиана с Ва-содержащим мусковитом с варьирующим отношением $\text{Ba}/(\text{Ba}+\text{K})$. Однако в присутствии диаспора/бёмита или при высокой активности ионов Al^{3+} в растворе этот парагенезис неустойчив — вместо него должен кристаллизоваться более богатый Ва мусковит (рис. 7) в соответствии с реакцией (в упрощенном виде) $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 2\text{AlO}(\text{OH}) \leftrightarrow 2(\text{Ba}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{Al}_2(\text{Si}_{2.5}\text{Al}_{1.5})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

В образце ийолита 161/21, где цельзиан является распространенным вторичным минералом (рис. 2, *з, е*), максимальное содержание ВаО в мусковите из парагенезиса с анальцимом и кальцитом в центре лейкократовых обособлений, замещающих канкринит, составляет 12.6 мас. %, или 0.36 а.ф. Ва. Мусковит из краевой части обособлений, где к указанному парагенезису добавляется цельзиан, содержит 2.2–4.6 мас. % ВаО, или 0.06–0.13 а.ф. Ва. Можно предполагать, что обогащенность мусковита барием и отсутствие цельзиана в центре обособлений обусловлены увеличением активности ионов Al^{3+} на фронте замещения канкринита анальцимом. Указанием на высвобождение Al при замещении канкринита анальцимом служит присутствие в образце ийолита 33/21 фазы $\text{AlO}(\text{OH})$ (рис. 2, *а*).

Изучение минерального состава щелочных пород Среднезиминского массива показало, что в них широко распространены сульфиды – пирит, пирротин, сфалерит, халькопирит, галенит, кристаллизация которых происходила как на магматическом этапе (включения пирита, халькопирита и сфалерита в диопсиде), так и на постмагматическом этапе (включения пирита в канкрините). Напротив, барит, по нашим данным, является очень редким минералом: нами он обнаружен только в составе продуктов низкотемпературного изменения пирохлора. Это позволяет предполагать, что образованию барита на постмагматическом этапе препятствовала низкая фуни- тивность кислорода. Соответственно, ионы Ba^{2+} , находящиеся в гидротермальном растворе, могли участвовать в образовании Ва-содержащей слюды и цельзиана.

ВЫВОДЫ

Полученные данные расширяют представления об условиях образования богатого Ва мусковита в природе. В магматических породах благоприятными факторами для его образования являются: 1) обогащенность исходных расплавов барием, что обуславливает кристаллизацию Ва-содержащих минералов на магматическом этапе; 2) широкое проявление процессов постмагматического замещения, способствующих извлечению ионов Ba^{2+} из минералов магматического этапа и переходу их в раствор; 3) восстановительные условия, обуславливающие стабильность сульфидов и препятствующие образованию барита на постмагматическом этапе. Дополнительным важным условием является нестабильная тектоническая обстановка во время становления интрузивных тел, благоприятная для миграции флюидов и растворов, переносящих барий.

При выполнении работы использовалось оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682.

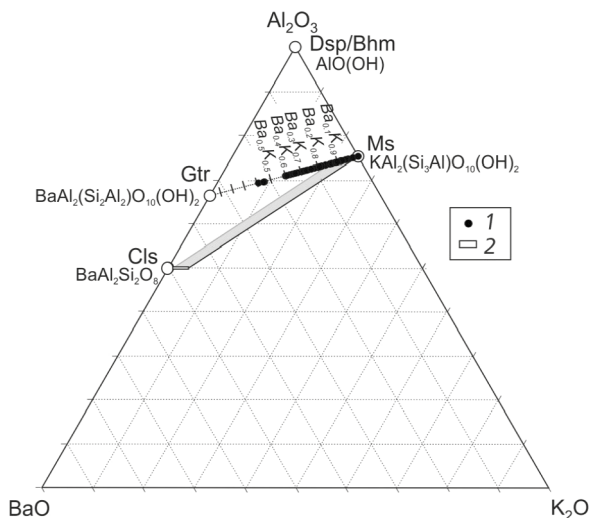


Рис. 7. Взаимоотношения Ва-содержащего мусковита и целзиана в гидротермально измененных ийолитах Среднезиминского массива (система $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}$).

1 — точки состава Ва-содержащего мусковита из образцов ийолитов 33/21 и 161/21; 2 — состав целзиана. Серая толстая линия соединяет состав целзиана и точки состава ассоциирующего Ва-содержащего мусковита в обр. 161/21. Пунктирная линия соединяет конечные члены твердого раствора $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2-\text{BaAl}_2(\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, подписи у поперечных линий показывают соотношение межслоевых катионов K^+ и Ba^{2+} в формуле барийсодержащего мусковита.

Fig. 7. Relationship between Ba-bearing muscovite and celsian in hydrothermally altered ijolites of the Sredneziminsky massif ($\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}$ system).

1 — composition points of Ba-bearing muscovite from ijolite samples 33/21 and 161/21; 2 — composition of celsian. The gray thick line connects the composition of celsian and composition points of the associated Ba-bearing muscovite in sample. 161/21. The dotted line connects the end members of the $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2-\text{BaAl}_2(\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ solid solution; the signatures of the transverse lines show the ratio of the interlayer K^+ and Ba^{2+} cations in the formula of barium-containing muscovite.

Изучение химического состава минералов выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту АААА-А21-121011390002-2.

Авторы выражают искреннюю признательность рецензенту, взявшему на себя труд ознакомиться с первоначальным вариантом статьи, за высказанные им конструктивные замечания и предложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Е.Д., Кононова В.А., Свешникова Е.В., Яшина Р.М. Магматические горные породы. Щелочные породы. М.: Наука, **1984**. 415 с.
- Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. Т. 3. Листовые силикаты. М.: Мир, **1966**. 318 с.
- Ильченко В.О., Антонов А.В. Околорудные метасоматиты Павловского полиметаллического месторождения (архипелаг Новая Земля) // Записки Горного института. **2004**. Т. 159. Ч. 1. С. 13–16.
- Макагонов Е.П., Котляров В.А. К минералогии глубоких горизонтов Ильменогорского миаскитового массива // Минералогия Урала: сборник научных статей V Всероссийского совещания. **2007**. <https://meetings.chelscience.ru/mineralogy-of-urals/2020/09/06/1204/>

Минералы. Справочник / Под ред. Ф.В. Чухрова. Т. IV. Вып. 1. Слоистые силикаты. М.: Наука, **1992**. 600 с.

Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России. М.: НИИ — Природа, **2003**. 494 с.

Юдовская М.А. Минералого-геохимические особенности и условия формирования руд Малеевского месторождения на Рудном Алтае. Автореф. дисс. ... канд. г.-м.н. М.: МГУ, **1995**. 29 с.

Barium-Bearing Micas of the Muscovite-Ganterite Series from Alkaline Rocks of the Sredneziminsky Ijolite-Syenite-Carbonatite Massif (Eastern Siberia, Russia)

V. B. Savelyeva^{a,*}, E. P. Bazarova^{a,**}, E. A. Khromova^{b,***}, B. S. Danilov^{a,****},
Y. V. Danilova^{a,*****}

^a Institute of the Earth's Crust Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia

^b Geological Institute N.L. Dobretsov Siberian Branch RAS, Ulan-Ude, Russia

*e-mail: vsavel@crust.irk.ru

** e-mail: bazarova@crust.irk.ru

*** e-mail: lena.khromova.00@mail.ru

**** e-mail: boris@crust.irk.ru

***** e-mail: jdan@crust.irk.ru

Barium-bearing micas (BaO content from 1.2 to 18.7 wt %) were found in hydrothermally altered ijolites and alkaline syenite of the Sredneziminsky ijolite-syenite-carbonatite massif (Eastern Siberia, Russia). It occurs in the products of low-temperature replacement of cancrinite, in association with natrolite, analcime, calcite, diaspore/boehmite, celsian, and strontianite. Ba-bearing micas are represented by grains up to 1 mm, heterogeneous in chemical composition. The amount of Ba increases in the marginal parts of grains; enrichment of some layers in mica grains with barium is also observed. The main isomorphic substitution in muscovite corresponds to the scheme $K^+ + Si^{4+} \leftrightarrow Ba^{2+} + IVAl^{3+}$. The empirical formula of barium-richest areas in one of the mica grains is $(Ba_{0.54-0.56}Sr_{0-0.09}K_{0.46})_{\Sigma 1.02-1.06}Al_{1.98-2.01}(Si_{2.37-2.40}Al_{1.60-1.63})_{\Sigma 4.00}O_{10}(OH_{1.70-2.00}F_{0-0.30})_{\Sigma 2.00}$, which corresponds to ganterite. The maximum content of BaO in the majority of muscovite grains of the Sredneziminsky massif is 14.0–14.9 wt % that is equal to 0.41–0.44 apfu Ba. It is assumed that the source of barium in the hydrothermal solution was orthoclase containing 0.5–0.9 wt % BaO which underwent albitization at the post-magmatic stage. The widespread occurrence of sulfides in the rocks indicates low oxygen fugacity, which prevents the formation of barite and is favorable to the formation of Ba-bearing muscovite and celsian.

Keywords: Sredneziminsky ijolite-syenite-carbonatite massif, barium-bearing muscovite, ganterite, celsian

REFERENCES

- Andreeva E.D., Kononova V.A., Sveshnikova E.V., Yashina R.M. Igneous rocks. Alkaline rocks. Moscow: Nauka, **1984**. 415 p. (in Russian).
- Armbruster T., Berlepsch P., Gnos E., Hetherington C.J. Crystal chemistry and structure refinements of barian muscovites from the Berisal Complex, Simplon region, Switzerland. *Schweiz. Miner. Petr. Mitt.* **2002**. Vol. 82. P. 537–547.
- Blanco-Quintero I.F., Lázaro C., García-Casco A., Proenza J.A., Rojas-Agramonte Y. Barium-rich fluids and melts in a subduction environment (La Corea and Sierra del Convento me'langes, eastern Cuba). *Contrib. Miner. Petrol.* **2011**. Vol. 162. P. 395–413.
- Bocchio R. Barium-rich phengite in eclogites from the Voltri Group (northwestern Italy). *Per. Miner. Spec. Issue: From Petrogenesis to Orogenesis*. **2007**. Vol. 76. P. 155–167.
- Brigatti M.F., Frigieri P., Poppi L. Crystal chemistry of Mg-, Fe-bearing muscovites-2M₁. *Amer. Miner.* **1998**. Vol. 83. P. 775–785.

- Chabu M., Boulègue J. Barian feldspar and muscovite from the Kipushi Zn-Pb-Cu deposit, Shaba, Zaire. *Canad. Miner.* **1992**. Vol. 30. P. 1143–1152.
- The New IMA List of Minerals — A Work in Progress — Updated: November **2020**. [http://cnmnc.main.jp/IMA_Master_List_\(2020-11\).pdf](http://cnmnc.main.jp/IMA_Master_List_(2020-11).pdf).
- Cotterell T.F., Green D.I., Tindle A.G., Kerbey H., Dosett I. Barium-rich muscovite and hyalophane from Benallt Mine, Rhiw, Pen Llŷn, Gwynedd. *J. Russell Soc.* **2019**. Vol. 22. P. 43–47.
- Dear W.A., Howey R.A., Zusman J. Rock-forming minerals. Vol. 3. Sheet silicates. Longman, **1962**. 270 p.
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladyskin N.V. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids. *J. Asian Earth Sci.* **2016**. Vol. 116. P. 81–96.
- Dymek R.F., Boak J.L., Kerr M.T. Green micas in the Archaean Isua and Malene supracrustal rocks, southern West Greenland, and the occurrence of a barian-chromian muscovite. *Rapp. Grönlands geol. Unders.* **1983**. Vol. 112. P. 71–82.
- Frolov A.A., Tolstov A.V., Belov S.V. Carbonatite deposits in Russia. Moscow: NIA–Priroda, **2003**. 494 p. (in Russian).
- Graeser S., Hetherington C.J., Gieré R. Ganterite, a new Barium-dominant analogue of muscovite from the Berical Complex, Simplon region, Switzerland. *Canad. Miner.* **2003**. Vol. 41. P. 1271–1280.
- Grapes R.H. Barian mica and distribution of barium in metacherts and quartzofeldspathic schists, Southern Alps, New Zealand. *Miner. Mag.* **1993**. Vol. 57(2). P. 265–272.
- Green D.I., Cotterell T.F., Tindle A.G. Barium substitution in muscovite with a comment on ganteritel. *J. Russell Soc.* **2019**. Vol. 22. P. 48–58.
- Harlow G.E. Crystal chemistry of barian enrichment in micas from metasomatized inclusions in serpentinite, Motagua Fault Zone, Guatemala. *Eur. J. Miner.* **1995**. Vol. 7. P. 775–789.
- Hatert F., Burke E.A.J. The IMA-CNMNC dominant-constituent rule revisited and extended. *Canad. Miner.* **2008**. Vol. 46. P. 717–728.
- Hetherington C.J., Gieré R., Graeser S. Composition of barium-rich white micas from the Berisal complex, Simplon region, Switzerland. *Canad. Miner.* **2003**. Vol. 41. P. 1281–1291.
- Ilchenko V.O., Antonov A.V. Near-ore metasomatites of the Pavlovsky polymetallic deposit (Novaya Zemlya archipelago). *J. Mining Institute*. **2004**. Vol. 159. N 1. P. 13–16 (in Russian).
- IMA List of Minerals (2023). <http://cnmnc.main.jp/>.
- Jiang S.-Y., Li Y.-H., Xue C.-J. Ba-rich micas from the Yindongzi-Daxigou Pb-Zn-Ag and Fe deposits, Qinling, northwestern China. *Miner. Mag.* **1996**. Vol. 60. P. 433–445.
- Lafuente B., Downs R.T., Yang H., Stone N. The power of databases: The RRUFF project. Highlights in Mineralogical Crystallography. Ed. T. Armbruster and R.M. Danisi. Berlin, München, Boston: De Gruyter (O). **2016**. P. 1–30. <https://doi.org/10.1515/9783110417104-003>
- Ma C., Rossman R.G. Ganterite, the barium mica $\text{Ba}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{Al}_2(\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.5})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, from Oreana, Nevada. *Amer. Miner.* **2006**. Vol. 91. P. 702–705.
- Makagonov E.P., Kotlyarov V.A. On the mineralogy of deep horizons of the Ilmenogorsk miaskite massif. In: *Proc. Sci. Conf. «Mineralogy of the Urals»*. **2007**. <https://meetings.chelscience.ru/mineralogy-of-urals/2020/09/06/1204/> (in Russian).
- Minerals. Handbook. Ed. F.V. Chukhrov. V. IV. Issue. 1. Layered silicates. Moscow: Nauka, **1992**. 600 p. (in Russian).
- Pan Y., Fleet M.E. Barian feldspar and barian-chromian muscovite from the Hemlo area, Ontario. *Canad. Miner.* **1991**. Vol. 29. P. 481–498.
- Raith M.M., Devaraji T.C., Spiering B. Paragenesis and chemical characteristics of the celsian–hyalophane–K-feldspar series and associated Ba-Cr micas in barite-bearing strata of the Mesoarchaeon Ghattihsahalli Belt, Western Dharwar Craton, South India. *Miner. Petrol.* **2014**. Vol. 108. P. 153–176.
- Rieder M., Cavazzini G., D'yakonov Y.S., Frank-Kamenetskii V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval P.V., Müller G., Neiva A.M.R., Radoslovich E.W., Robert J.-L., Sassi F.P., Takeda H., Weiss Z., Wones D.R. Nomenclature of the micas. *Canad. Miner.* **1998**. Vol. 36. P. 905–912.
- Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V. Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rock. *Lithos*. **2019**. Vol. 338–339. P. 141–154.
- Tracy R.J. Ba-rich micas from the Franklin Marble, Lime Crest and Sterling Hill, New Jersey. *Amer. Miner.* **1991**. Vol. 76. P. 1683–1693.
- Yudovskaya M.A. Mineralogical and geochemical features and conditions for the formation of ores of the Maleevsky deposit in Rudny Altai. Ph.D. thesis syn. Moscow: Moscow State University, **1995**. 29 p. (in Russian).