

---

---

## МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

---

---

### МИНЕРАЛЫ СТРОНЦИЯ И БАРИЯ В ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОДАХ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО ИЙОЛИТ-СИЕНИТ-КАРБОНАТИТОВОГО МАССИВА (ЮГО-ЗАПАДНАЯ ОКРАИНА СИБИРСКОГО КРАТОНА)

© 2023 г. Д. члены В. Б. Савельева<sup>1</sup>, \*, Е. П. Базарова<sup>1</sup>, \*\*, Е. А. Хромова<sup>2</sup>, \*\*\*

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

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

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

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

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

Поступила в редакцию 15.07.2022 г.

После доработки 12.10.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Охарактеризованы Sr- и Ba-содержащие минералы в мельтейгите, ийолитах, уртите и нефелиновых сиенитах Большетагнинского ийолит-сиенит-карбонатитового массива. На магматической стадии стронций входит в виде изоморфной примеси в кальцит (SrO 0.5–1.9 мас. %) и фторапатит (SrO 0.6–2.6 мас. %), а барий – преимущественно во флогопит и аннит. Зональный флогопит в уртите содержит до 8.4 мас. % BaO (24 мол. % киношталитового компонента); интерстициальный кальцит в этой же породе содержит мелкие вростки карбоната Ba и Ca. На высокотемпературной постмагматической стадии происходила кристаллизация стрональсита, стронцианита, кричтонита, генримейерита, барита, целестина, Sr-содержащего фторкальциопирохлора, Sr-содержащих мусковита и эпидота. В экзоконтактной зоне карбонатитового штока ийолиты и нефелиновые сиениты претерпели биотитизацию, карбонатизацию и калишпатизацию, с последующей хлоритизацией и образованием на отдельных участках скоплений и прожилков гиалофана и цельзиана. На низкотемпературной гидротермальной стадии происходило также образование Ba-содержащего мусковита и Ba-содержащих гидроксидов марганца. Присутствие в измененных щелочных породах гиалофана и цельзиана является особенностью Большетагнинского массива, указывающей на низкую активность  $SO_4^{2-}$  в гидротермальных растворах.

*Ключевые слова:* Большетагнинский массив, Урикско-Ийский грабен, бариевый флогопит, стрональсит, генримейерит, гиалофан, цельзиан

DOI: 10.31857/S0869605523010094, EDN: NIABNS

### ВВЕДЕНИЕ

Щелочноземельные элементы Sr и Ba, наряду с P, Nb, Ta, Zr, REE, являются характерными химическими элементами ультраосновных щелочных комплексов с карбонатитами. Будучи близкими по химическим свойствам, при кристаллизации силикатных расплавов эти элементы ведут себя по-разному: стронций проявляет химическое сродство с кальцием, а барий – с калием. На ранних стадиях кристаллизации расплавов Sr и Ba обычно не образуют собственных фаз, а в виде изоморфных примесей входят в

состав породообразующих и аксессуарных минералов, однако на постмагматической стадии могут образовываться самостоятельные стронциевые и бариевые минералы (Магматические..., 1984). С поздними карбонатитами в комплексах щелочных ультраосновных пород в некоторых случаях связаны проявления барита и стронцианита (Капустин, 1971; Фролов и др., 2003).

Большетагнинский ийолит-сиенит-карбонатитовый массив, расположенный на юго-восточной окраине Сибирского кратона, входит в состав позднерифейского зиминского щелочного комплекса, с которым связаны крупные запасы Nb, Ta, REE, U, Pb, Zn, флюорита и микроклина (Фролов, Белов, 1999). Щелочные силикатные породы массива характеризуются, в целом, высоким содержанием Sr (840–2900 ppm) и сильно варьирующим содержанием Ba (180–35800 ppm). В них обнаружены стрональзит, стронцианит, бариевый флогопит, баритокальцит, генримейрит, гиалофан, целъзиан. Целью работы являлась характеристика поведения Ba и Sr на разных стадиях формирования и преобразования массива. Основное внимание уделялось щелочным породам, отличающимся наибольшим разнообразием минералов Ba и Sr.

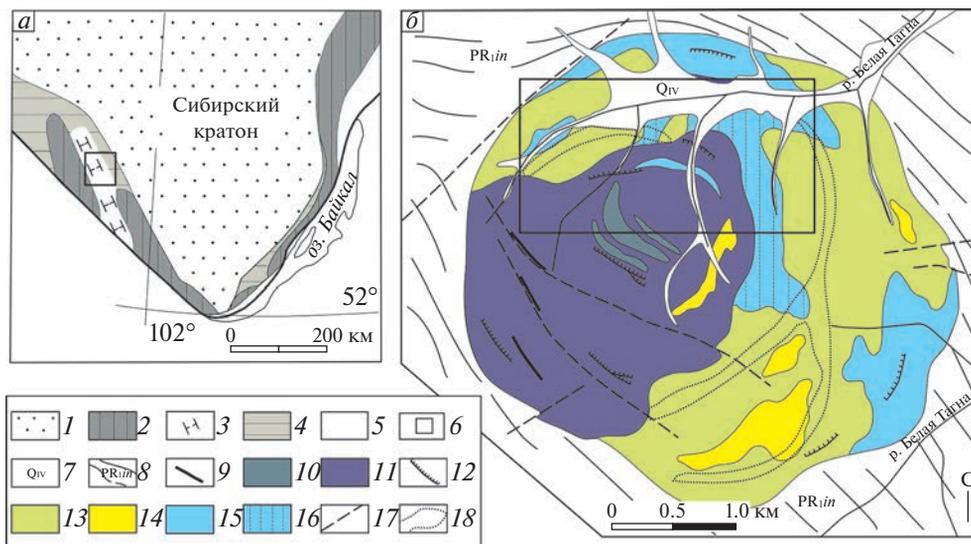
### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И СТРОЕНИЕ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МАССИВА

Большетагнинский массив принадлежит к Восточно-Саянской щелочной провинции, выделяемой на юго-западной окраине Сибирского кратона, в зоне сочленения кратона с Алтае-Саянской складчатой областью (Андреева и др., 1984). Массив располагается в пределах Урикско-Ийского грабена, выполненного осадочными и вулканогенно-осадочными отложениями нижнего протерозоя и нижнего рифея (Гладкочуб и др., 2014) (рис. 1, а). Щелочные породы зиминского комплекса в грабене представлены массивами ийолит-мельтейгитов, нефелиновых сиенитов и карбонатитов – Белозиминским, Среднезиминским и Большетагнинским, а также дайками ультрамафических лампрофиров, пикритовых порфиритов, нефелинитов и трубками взрыва. С Большетагнинским массивом связано среднее по запасам месторождение Nb, а также скопления микроклина и флюорита (Пикалова, 2017).

Обнаженность Большетагнинского массива плохая. Согласно работам предшественников (Кожевников и др., 1974; Фролов, Белов, 1999), массив имеет правильную округлую форму, диаметр около 4 км и зонально-кольцевое строение, обусловленное последовательным формированием серии пород: ийолиты-мельтейгиты, нефелиновые сиениты, субщелочные калишпатовые сиениты, пикритовые порфириты, карбонатиты (рис. 1, б). В современном эрозионном срезе среди щелочных пород преобладают ийолиты, которые, как правило, биотитизированы, калишпатизированы и карбонатизированы, особенно в экзоконтактовом ореоле карбонатитового штока. Отличительной чертой Большетагнинского массива является широкое развитие субщелочных калишпатовых сиенитов, которые некоторыми исследователями рассматриваются как метасоматиты (микроклиниты) (Пикалова, 2017). Кальцитовые карбонатиты слагают шток площадью около 3.8 км<sup>2</sup> в западной части массива; к центральной части штока приурочены зоны флюоритизации. Дайки пикритовых порфиритов образуют тела мощностью до 20 м и протяженностью до нескольких сотен метров. Начало формирования даек приходится на докарбонатитовый этап, часть даек интракарбонатитовые. Пироклоровая минерализация приурочена, главным образом, к зонам катаклаза, перекристаллизации и апатитизации, захватывающим преимущественно калишпатовые сиениты, а также слюдитам (рис. 1, в).

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диагностика минералов и изучение их химического состава выполнены на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss, Германия) с системой энерго-



**Рис. 1.** Схемы геологического строения южной части Сибирского кратона (а) и Большетагнинского массива по (Фролов, Белов, 1999) с упрощением (б).

а: 1 – фанерозойский осадочный чехол; 2 – раннедокембрийские выступы фундамента; 3 – палеопротерозойский Урикско-Ийский грабен; 4 – отложения неопротерозойской окраины кратона; 5 – Центрально-Азиатский складчатый пояс; 6 – местонахождение Большетагнинского массива; б: 7 – кайнозойские отложения; 8 – ингашинская свита PR<sub>1</sub>: сланцы, песчаники, кварциты, доломиты; 9 – гематитовые рудные тела; 10 – кальцитовые карбонатиты с флюоритом и гематитом; 11 – кальцитовые карбонатиты крупнозернистые и мелкозернистые; 12 – пикритовые порфириты; 13 – калишпатовые субщелочные сиениты, 14 – нефелиновые сиениты; 15 – ийолиты и мельтейгиты; 16 – карбонатизированные, биотитизированные, калишпатизированные ийолиты, калишпат-биотит-кальцитовые и биотит-кальцитовые породы (слюдиты) по (Кожевников и др., 1974); 17 – разломы; 18 – апатит-пироксеновые руды. На рис. б прямоугольником показан участок работ.

**Fig. 1.** Geological schemes of the southern part of the Siberian craton (a) and the Bolshetagninsky massif after (Frolov, Belov, 1999), simplified (b).

а: 1 – Phanerozoic sedimentary cover; 2 – projections of the Early Precambrian basement; 3 – Paleoproterozoic Uriksko-Iysky graben; (4) rocks of the Neoproterozoic margin of the craton; 5 – Central Asian folded belt; 6 – location of the Bolshetagninsky massif; б: 7 – Cenozoic deposits; 8 – Ingashinskaya formation PR<sub>1</sub>: shales, sandstones, quartzites, dolomites; 9 – hematite ore bodies; 10 – calcite carbonatites with fluorite and hematite; 11 – coarse-grained and fine-grained calcite carbonatites; 12 – picrite porphyrites; 13 – K-feldspar subalkaline syenites, 14 – nepheline syenites; 15 – ijolites and melteigites; 16 – carbonatized, biotitized, K-feldspathized ijolites, K-feldspar-biotite-calcite and biotite-calcite rocks, after (Kozhevnikov et al., 1974); 17 – faults; 18 – apatite-pyroxene ores. On Fig. b rectangle shows the studied area.

дисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобритания) в ЦКП “Геоспектр” ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Определение содержаний Ba и Sr в породах выполнено в ЦКП “Геодинамика и геохронология” ИЗК СО РАН (г. Иркутск) методом рентгенофлуоресцентного анализа, аналитик Е.В. Худоногова.

## ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД МАССИВА

Наши работы проводились в северной части массива, кроме того, изучались образцы из керна скважин. Мельтейгит (рис. 2, а) представляет собой мелкозернистую по-

роду; главными минералами являются диопсид ( $\text{Di}_{66-78}\text{Aeg}_{13-24}\text{Ged}_{5-18}$ ) и кальцит, второстепенными калиевый полевой шпат, серицитизированный минерал (предположительно, нефелин), титаномагнетит, титансодержащий андрадит, флогопит ( $X_{\text{Mg}} 0.69-0.76$ ). Ийолиты (рис. 2, б) средне-крупнозернистые породы, нередко пятнистые с обособлениями кальцита. Они сложены измененным нефелином (30–55%), диопсидом  $\text{Di}_{49-86}\text{Ged}_{8-35}\text{Aeg}_{0-23}$  (25–40%), титансодержащим андрадитом (5–25%), кальцитом (10–40%). Вторичные минералы по нефелину представлены канкринитом, калиевым полевым шпатом, серицитом/мусковитом, реже мейонитом. Титансодержащий андрадит развивается по границам зерен диопсида, кальцита и нефелина. В промежутках между зернами клинопироксена присутствует биотит ( $X_{\text{Mg}} 0.39-0.44$ ), отмечается рихтерит. Акцессорные минералы представлены апатитом, магнетитом, титаномагнетитом, титанитом, рутилом, баритом и др.

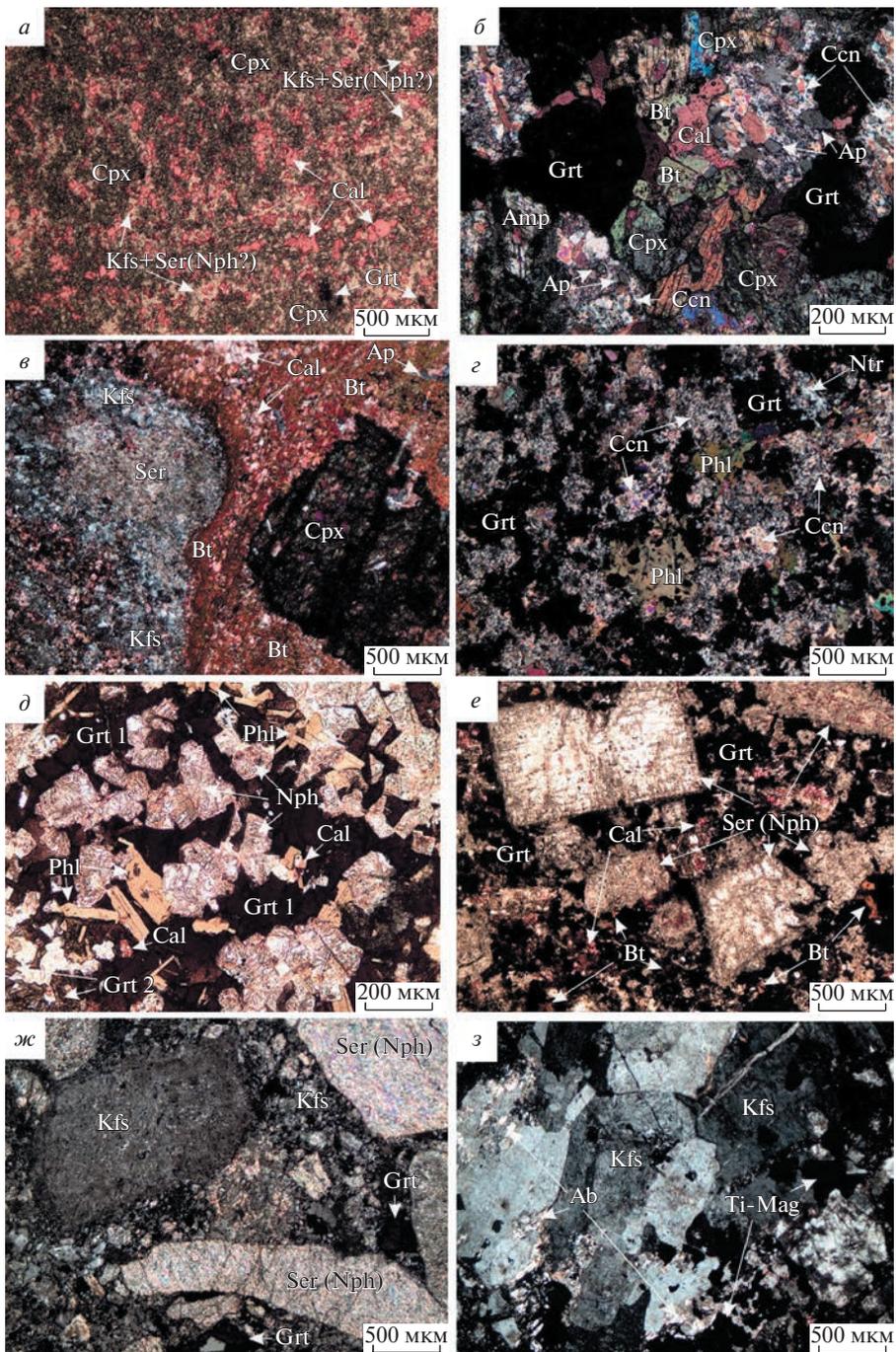
В северной части массива неизменные ийолиты встречаются редко. В основном они в разной степени замещены кальцитом, биотитом, калиевым полевым шпатом (рис. 2, в). Титансодержащий андрадит преобразован в агрегат рутила, андрадита и/или магнетита; нефелин нацело замещен серицитом (мусковитом), калиевым полевым шпатом, кальцитом.

Редкой породой, обнаруженной среди ийолитов, является уртит. Из-за очень плохой обнаженности массива морфология слагаемого уртитом тела не ясна, возможно, это жила. Уртит (рис. 2, г) представляет собой мелкозернистую мезократовую породу, сложенную канкринитизированным нефелином (70–75%), гранатом (12–15%), флогопитом (5–7%), кальцитом, с акцессорными перовскитом, апатитом, титаномагнетитом, титанитом, флюоритом и др. Реликты неизменного нефелина встречаются только во включениях в гранате (рис. 2, д). Кроме канкринита в состав продуктов замещения нефелина входят мусковит и стрональсит. Гранат представлен двумя генерациями (рис. 2, д). Титансодержащий андрадит ранней генерации выполняет промежутки между зернами нефелина и флогопита; андрадит или гроссуляр-андрадит поздней генерации обрастает зерна граната ранней генерации, перовскита, замещает титаномагнетит, кальцит, канкринит, флогопит.

Нефелиновые сиениты слагают участки среди калишпатовых сиенитов. Это средне-крупнозернистые породы, сложенные зернами нефелина, замещенного серицитом, промежутки между которыми выполнены калиевым полевым шпатом, мелким серицитизированным нефелином, кальцитом и редкими зернами клинопироксена, замещаемого кальцитом и хлоритом и сохранившимся только в реликтах.

Нефелиновые сиенит-порфиры (рис. 2, е, ж) встречаются в виде жил и даек мощностью до 2.5 м среди ийолитов. Породы имеют варьирующий минеральный состав: серицитизированный нефелин 20–50%, калиевый полевой шпат 5–35%, клинопироксен – титанистый авгит ( $\text{TiO}_2$  3.1–3.8 мас. %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  7.4–8.8 мас. %) и диопсид ( $\text{Di}_{72-76}\text{Ged}_{20-25}\text{Aeg}_3$ ) 0–25%, аннит ( $X_{\text{Mg}} 0.30-0.42$ ) 5–20%, гранат (титансодержащий андрадит, андрадит, андрадит-гроссуляр) до 20%, кальцит до 10%. Вкрапленники величиной до 8 мм образованы нефелином, в некоторых жилах также клинопироксеном или калиевым полевым шпатом. Акцессорные минералы представлены титаномагнетитом, магнетитом, апатитом, рутилом, цирконом, флюоритом, баритом и др. Измененный нефелин встречается только в виде реликтов в гранате; гранат содержит также включения титаномагнетита, биотита, калиевого полевого шпата и др. Клинопироксен частично или полностью замещен биотитом, хлоритом, кальцитом. Породы нередко катаклазированы; в них проявлены карбонатизация и замещение серицитизированного нефелина калиевым полевым шпатом.

Эгириновые сиениты, согласно О.К. Кожевникову и др. (1974), образуют небольшие поля среди нефелиновых и калишпатовых сиенитов. Образец из керна сложен ка-



←  
**Рис. 2.** Основные разновидности изученных пород (фотографии прозрачных шлифов).

*a* – мельтейгит; *б* – ийолит; нефелин полностью замещен канкринитом; *в* – карбонатизированный и биотитизированный ийолит с нефелином, замещенным серицитом/мусковитом и калиевым полевым шпатом; *з*, *д* – уртит; на рис. *д* нефелин среди титаносодержащего андрадита частично или полностью замещен канкринитом, серицитом/мусковитом, стрональситом; *е*, *ж* – нефелиновый сиенит-порфир (*ж* – катаклазированный), нефелин замещен серицитом/мусковитом; *з* – калишпатовый сиенит катаклазированный. Ab – альбит, Adr – андрадит, Amp – амфибол, Ann – аннит, Ap – апатит, Ba-cal – баритокальцит, Ba Fs – бариевый полевой шпат, Ba-Mn ox – Ba-содержащие гидроксиды Mn, Ba Ms – Ba-содержащий мусковит, Brt – барит, Bt – биотит, Cal – кальцит, Ccn – канкринит, Chl – хлорит, Cpx – клинопироксен, Csl – цельзиан, Fkns – феррокиношталит, Grt – гранат (Grt 1 – гранат ранней генерации, титаносодержащий андрадит, Grt 2 – гранат поздней генерации, андрадит, гроссуляр-андрадит), Hm – генримейерит, Hy – гиалофан, Kfs – калиевый полевой шпат, K-Ba Fs – барийсодержащий калиевый полевой шпат, Kns – киношталит, Ms – мусковит, Nph – нефелин, Ntr – натролит, Pcl – пирохлор, Phl – флогопит, Pph – пиропанит, Prv – перовскит, Rt – рутил, Ser – серицит, Str – стронцианит, Sts – стрональсит, Ti-Mag – титаномagnetит, Ttn – титанит.

**Fig. 2.** Main varieties of studied rocks (photographs of thin sections).

*a* – melteigite; *б* – ijolite; nepheline is completely replaced by cancrinite; *в* – carbonatized and biotitized ijolite with nepheline replaced by sericite/muscovite and K-feldspar; *з*, *д* – urtite; in Fig. *д* nepheline among titanium-bearing andradite is partially or completely replaced by cancrinite, sericite/muscovite, stromalosite; *е*, *ж* – nepheline syenite porphyry (*ж* – cataclased), nepheline is replaced by sericite/muscovite; *з* – cataclased K-feldspar syenite. Ab – albite, Adr – andradite, Amp – amphibole, Ann – annite, Ap – apatite, Ba-cal – barytocalcite, Ba Fs – barium feldspar, Ba-Mn ox – Ba-containing Mn hydroxides, Ba Ms – Ba-containing muscovite, Brt – barite, Bt – biotite, Cal – calcite, Ccn – cancrinite, Chl – chlorite, Cpx – clinopyroxene, Csl – celsian, Fkns – ferrokinoshitalite, Grt – garnet (Grt 1 – early generation garnet, titanium-bearing andradite, Grt 2 – late generation garnet, andradite, grossular andradite), Hm – henrimeyerite, Hy – hyalophane, Kfs – potassium feldspar, K-Ba Fs – barium-bearing potassium feldspar, Kns – kinoshitalite, Ms – muscovite, Nph – nepheline, Ntr – natrolite, Pcl – pyrochlore, Phl – phlogopite, Pph – pyrophanite, Prv – perovskite, Rt – rutile, Ser – sericite, Str – strontianite, Sts – stromalosite, Ti-Mag – titanomagnetite, Ttn – titanite.

лиевым полевым шпатом (65–70%) и эгирином (25–30%), с аксессуарными фторапатитом, минералом группы пирохлора, монацитом, баритом, стронцианитом.

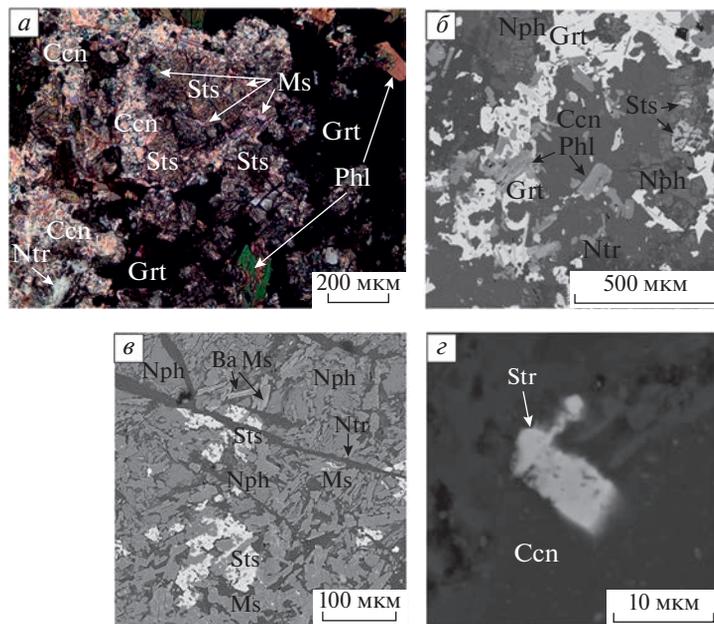
Калишпатовые сиениты (рис. 2, *з*) представляют собой лейкократовые породы, преимущественно неравномернозернистые, катакlastической или брекчиевидной структуры. Они почти нацело сложены калиевым полевым шпатом, темноцветные минералы представлены титаномagnetитом и magnetитом. Брекчирование сопровождалось перекристаллизацией калиевого полевого шпата в мелкозернистый агрегат, его замещением альбитом и побурением. В экзоконтактном ореоле карбонатитового штока в калишпатовых сиенитах проявлена карбонатизация.

Кальцитовые карбонатиты варьируют от мелко- до крупнозернистых. Среди зерен кальцита наблюдаются скопления апатита, отмечаются доломит, альбит, диопсид, эгирин, magnetит, минерал группы пирохлора, бурбанкит, стронцианит.

Слюдиты, образующие залежи на контакте ийолитов и карбонатитов, сложены биотитом ( $X_{Mg}$  0.31–0.46), кальцитом и в переменном количестве калиевым полевым шпатом; они часто содержат реликты серицитизированного нефелина, хлоритизированного клинопироксена, альбит, железистый доломит, апатит, минерал группы пирохлора, пирит, пирротин. Апатитизация проявлена в виде прожилков и гнезд; содержание апатита достигает 40%. Наиболее поздними гидротермально-метасоматическими образованиями являются гематитовые жилы.

## SR-СОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ

Наиболее распространенными Sr-содержащими минералами в породах Большететинского массива являются кальцит и фторапатит. *Кальцит* содержит 0.5–1.9 мас. % SrO; количество FeO составляет 0.3–0.7 мас. %, MnO – 0.3–0.6 мас. %. Содержание SrO в *фторапатите* составляет 0.6–1.9 мас. %; зональность в зернах фторапатита не выявлена.



**Рис. 3.** Минералы Sr в породах массива.

*a, б* – стрональсит, в ассоциации с мусковитом и канкринитом замещающий нефелин в уртите; *в* – прожилки натролита, секущие стрональсит и мусковит; *з* – стронцианит среди канкринита; *д* – зональный пироклор в апатитовом метасоматите. *a* – фотография прозрачного шлифа, *б–д* – изображения в режиме обратно-рассеянных электронов.

**Fig. 3.** Strontium-bearing minerals in rocks of the massif.

*a, б* – stronalsite, in association with muscovite and cancrinite, replacing nepheline in urtite; *в* – natrolite veinlets intersecting stronalsite and muscovite; *з* – strontianite among cancrinite; *д* – zoned pyrochlore in apatite metasomatite. *a* – photograph of thin section, *б–д* – BSE-images.

*Стрональсит* обнаружен в уртите, где в ассоциации с мусковитом и канкринитом является продуктом замещения зерен нефелина (рис. 3, *a, б*, табл. 1). Канкринит, в свою очередь, замещается натролитом (табл. 1), а стрональсит сечется трещинками, выполненными натролитом (рис. 3, *в*), что указывает на более раннее образование стрональсита по отношению к цеолиту. Количество Sr в минерале составляет 0.89–0.96 к.ф., Ba – 0.02–0.07 к.ф., сумма (Sr + Ba) – 0.92–1.01 к.ф., дефицит катионов дополняется Ca. Отношение Si/Al в анализах близко к стехиометрическому или несколько превышает его (1.04–1.08). На долю стрональсита  $\text{SrNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$  приходится 89–96 мол. %, банальсита  $\text{BaNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$  2–7 мол. % и лисетита  $\text{CaNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$  0–8 мол. %.

В некоторых анализах *мусковита*, замещающего нефелин в нефелиновых сиенитах и ийолитах, присутствует примесь SrO в количестве до 1.9 мас. % (табл. 1, ан. 7). В ассоциации с мусковитом и манганильменитом отмечен *эпидот*, содержащий 2.5 мас. % SrO. *Кричтонит*, вторичный минерал по титаномagnetиту и титансодержащему андрадиту, содержит 7.0 мас. % SrO (табл. 2, ан. 1).

Минералы группы *пироклора* в изученных нефелинсодержащих породах являются редкими, в то же время они распространены в апатитизированных калишпатовых сиенитах, слюдитах, карбонатитах (рис. 3, *д*). В соответствии с современной классификацией (Atencio et al., 2010) это преимущественно фторкальциопироклор. Содержание

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) нефелина и продуктов его замещения  
**Table 1.** Chemical composition (wt %) of nepheline and products of its alteration

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO <sub>2</sub>	41.18	34.79	40.03	39.21	39.71	47.15	43.27	42.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.11	28.68	32.08	31.95	32.54	25.92	37.04	37.36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.97		0.44	0.89	0.83	0.39	0.89	1.17
MgO							0.44	
CaO	0.28	7.39	1.29	1.11	0.73			
SrO			16.31	15.72	15.61		1.90	
BaO				1.69	0.51		0.78	3.46
Na <sub>2</sub> O	14.49	17.94	9.10	9.04	9.15	14.75		
K <sub>2</sub> O	8.71				0.25		11.27	11.40
SO <sub>3</sub>		0.67						
Сумма	99.74	89.47	99.97	99.61	99.33	88.21	95.59	95.51
Расчет*	O=4	O=26	O=16	O=16	O=16	O=10	O=11	O=11
Коэффициенты в формулах								
Si	1.01	6.21	4.07	4.03	4.05	3.04	2.93	2.89
Al	0.98	6.06	3.85	3.87	3.91	1.97	2.96	3.02
Fe <sup>3+</sup>	0.02		0.03	0.07	0.06	0.02	0.05	0.06
Mg							0.04	
Ca	0.01	1.41	0.14	0.12	0.08			
Sr			0.96	0.94	0.92		0.07	
Ba			0.03	0.07	0.02		0.02	0.09
Na	0.69	6.21	1.79	1.80	1.81	1.85		
K	0.27				0.03		0.97	1.00
S		0.09						

Примечание. 1 – нефелин, 2 – канкринит, 3–5 – стрональсит, 6 – натролит, 7, 8 – мусковит. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> расчетное. Расчет\* – способ расчета коэффициентов в кристаллохимических формулах: O – количество атомов кислорода.

TiO<sub>2</sub> в анализах варьирует от 2.8 до 16.6 мас. %, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ниже пределов обнаружения, количество SrO составляет 0.7–4.6 мас. % (табл. 2, ан. 2).

*Стронцианит* отмечен в уртите в виде мелких (около 10 мкм) включений в минералах группы канкринита, замещающих нефелин (рис. 3, з). В эгириновом сиените стронцианит (табл. 2, ан. 3) в ассоциации с баритом образует включение в кальците. В карбонатите стронцианит обнаружен в ассоциации с *бурбанкитом* (табл. 2, ан. 4).

Распространенным минералом в породах массива является *барит*, содержащий 0.8–6.6 мас. % SrO. В ийолитах и нефелиновых сиенитах барит встречается в виде включений в гранате, калиевом полевом шпате, кальците, в ассоциации с биотитом, хлоритом, мусковитом и др. *Целестин* (SrO 54.3 мас. %) отмечен в виде включения в скаполите, заместившем нефелин в ийолите. *Флюорит*, наблюдающийся среди зерен кальцита в уртите и нефелиновом сиените, содержит 0.4–0.5 мас. % SrO.

**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) аксессуарных минералов Sr и Ba  
**Table 2.** Chemical composition (wt %) of Sr- and Ba-bearing accessory minerals

Компоненты	1	2	3	4	5
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		44.96			
SiO <sub>2</sub>	2.82	2.95			
TiO <sub>2</sub>	54.63	14.83			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.93				
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2.09		1.30	
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.94	3.03		1.18	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.18	0.60			
MnO	2.70				
CaO	4.02	20.34	8.03	11.89	19.24
ZnO	1.85				
SrO	7.02	4.58	59.95	33.81	
BaO				9.22	51.66
Na <sub>2</sub> O		4.37		8.53	
F		5.40			
—O(F)		2.27			
Сумма	100.09	100.88	67.98	65.93	70.90
Расчет	O=38	Σ <sub>кат</sub> =2	Σ <sub>кат</sub> =1	Σ <sub>кат</sub> =6	Σ <sub>кат</sub> =2
Nb		1.17			
Si	0.82	0.17			
Ti	11.97	0.64			
Al	0.32				
La		0.04		0.05	
Ce	0.10	0.06		0.05	
Fe <sup>3+</sup>	5.52	0.03			
Mn	0.67				
Ca	1.25	1.25	0.20	1.43	1.01
Zn	0.40				
Sr	1.19	0.15	0.80	2.20	
Ba				0.41	0.99
Na		0.49		1.86	
F		0.98			

Примечание: 1 – кричтонит, 2 – фторкальциопироксид; 3 – стронцианит, 4 – бурбанкит, 5 – карбонат Ba и Ca (баритокальцит?). Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> расчетное. Σ<sub>кат</sub> – сумма катионов.

В альбитизированных калишпатовых сиенитах в ассоциации с рибекитом, титаномагнетитом и магнетитом отмечен *монацит*-(Ce), содержащий 1.0–2.8 мас. % SrO. В измененных нефелиновых сиенитах в ассоциации с мусковитом и рутилом обнаружены *бастнезит*-(Ce-La) и *синхизит*-(Ce), содержащие около 1 мас. % SrO.

### Ва-СОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ

Основными концентраторами бария являются минералы калия вследствие близости ионных радиусов K<sup>+</sup> и Ba<sup>2+</sup>. В породах Большетагнинского массива это, в первую очередь, Mg-Fe слюды и калиевый полевой шпат. В нефелине Ba не обнаружен.

Состав магнезиально-железистой слюды в щелочных породах массива варьирует от флогопита (мельтейгит, уртит) до аннита (нефелиновые сиениты). Количество BaO в анализах изменяется от незначительного (ниже пределов обнаружения) до 3.1–3.5 мас. %

**Таблица 3.** Химический состав (мас. %) Ва-содержащих флогопита и аннита  
**Table 3.** Chemical composition (wt %) of Ba-bearing phlogopite and annite

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7		8				9	
							Ц	Кр	Ц	Пр	Пр	Кр	Ц	Кр
SiO <sub>2</sub>	35.78	33.89	33.37	41.42	40.41	40.95	40.93	37.44	38.77	35.68	34.72	40.58	36.16	40.99
TiO <sub>2</sub>	0.80	2.44	2.25		0.38					0.88				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.07	13.04	12.43	11.73	11.26	11.24	11.49	14.06	11.75	14.32	14.91	11.70	16.19	12.05
FeO <sub>общ</sub>	13.95	24.12	25.64	9.30	9.06	7.04	7.86	5.76	6.74	6.47	6.50	8.59	5.94	7.96
MnO	0.44	1.10	0.74	1.92	0.43	0.63			0.70	0.46	0.57	1.81		1.76
MgO	17.57	9.65	8.51	20.99	23.42	23.58	24.86	24.73	23.40	22.40	22.02	21.66	22.40	20.88
BaO	3.12	3.08	3.51	0.69	0.75	0.73	0.80	5.35	1.84	5.09	7.84		5.77	
Na <sub>2</sub> O														
K <sub>2</sub> O	9.83	9.56	8.54	10.83	11.12	11.08	11.41	9.42	10.60	9.03	8.35	10.36	8.91	10.58
F	1.41				1.31	2.49	1.16	1.72		2.85	1.93		2.11	
—O(F)	0.60				0.55	1.05	0.49	0.42		1.20	0.81		0.89	
Сумма	95.37	96.88	94.99	96.88	97.59	96.69	98.02	98.06	93.80	95.98	96.03	94.70	96.59	94.22
Расчет	O=11													
Коэффициенты в формулах														
Si	2.78	2.72	2.75	3.01	2.93	2.99	2.94	2.76	2.90	2.71	2.67	2.99	2.70	3.02
Ti	0.05	0.15	0.14		0.02					0.05				
Al	1.20	1.23	1.21	1.00	0.96	0.97	0.97	1.22	1.04	1.28	1.35	1.01	1.43	1.05
Fe <sup>2+</sup>	0.91	1.62	1.76	0.56	0.55	0.43	0.47	0.35	0.42	0.41	0.42	0.53	0.37	0.49
Mn	0.03	0.07	0.05	0.12	0.03	0.04			0.04	0.03	0.04	0.11		0.11
Mg	2.03	1.15	1.04	2.27	2.53	2.56	2.66	2.71	2.61	2.53	2.52	2.38	2.49	2.29
Ba	0.09	0.10	0.11	0.02	0.02	0.02	0.02	0.15	0.05	0.15	0.24		0.17	
Na														
K	0.97	0.98	0.90	1.00	1.03	1.03	1.04	0.88	1.01	0.87	0.82	0.97	0.85	0.99
F	0.35				0.30	0.57	0.26	0.40		0.68	0.47		0.50	
X <sub>Mg</sub>	0.69	0.42	0.37	0.80	0.82	0.86	0.85	0.88	0.86	0.86	0.86	0.82	0.87	0.82
X <sub>Ba</sub>	0.09	0.09	0.09	0.02	0.02	0.02	0.02	0.15	0.05	0.15	0.22		0.17	
Компоненты	10				11			12			13			
	Ц	Пр	Пр	Кр	Ц	Пр	Кр	Ц	Пр	Кр	Ц	Кр		
SiO <sub>2</sub>	38.04	37.59	34.23	38.98	39.00	37.87	34.21	41.16	35.79	34.85	40.69	34.64		
TiO <sub>2</sub>						0.43								
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.60	14.04	16.95	15.46	11.45	12.45	15.34	10.83	15.13	15.89	11.34	16.21		
FeO	6.88	6.42	5.03	6.96	8.54	6.96	5.91	7.23	5.45	5.45	7.40	5.56		
MnO	0.68	0.46		1.27	0.67	0.72	0.41	0.45			0.65			
MgO	23.08	22.65	22.44	21.26	23.50	23.27	22.88	23.88	23.13	24.11	24.76	23.37		
BaO	2.80	5.34	6.55	0.82	1.00	3.67	8.43	0.96	7.77	7.59	1.35	7.39		
Na <sub>2</sub> O			0.57											
K <sub>2</sub> O	10.06	9.14	8.42	10.59	10.31	9.88	8.40	11.35	8.96	9.01	11.19	8.55		
F	2.79	2.06	1.84	1.88	2.07	1.38	1.96		2.01	1.55	2.18	2.22		
—O(F)	1.17	0.87	0.77	0.79	0.87	0.58	0.82		0.85	0.65	0.92	0.93		

Таблица 3. Окончание

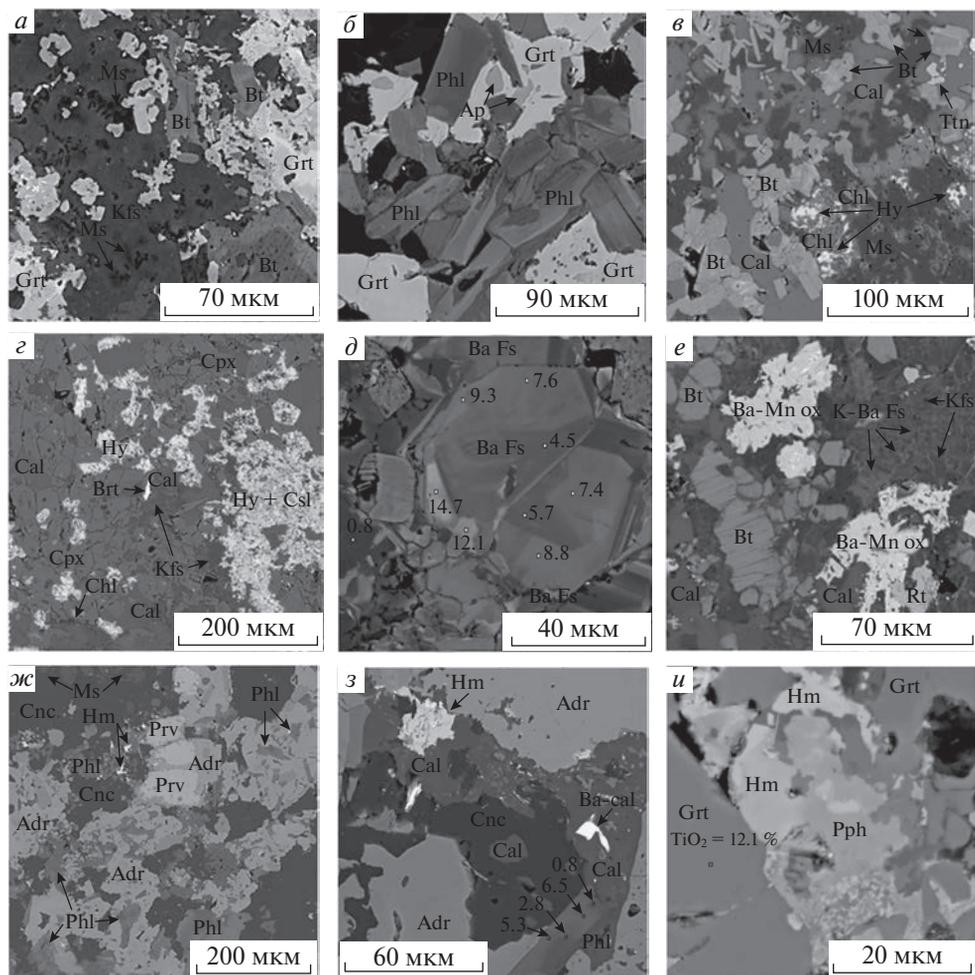
Компоненты	10				11			12			13	
	Ц	Пр	Пр	Кр	Ц	Пр	Кр	Ц	Пр	Кр	Ц	Кр
Сумма	96.76	96.83	95.26	97.43	96.10	95.62	96.72	95.86	97.39	97.80	98.64	97.01
Расчет	O=11											
Коэффициенты в формулах												
Si	2.82	2.81	2.61	2.84	2.89	2.84	2.62	3.00	2.69	2.61	2.93	2.61
Ti					0.02							
Al	1.19	1.23	1.52	1.33	1.00	1.10	1.38	0.93	1.34	1.40	0.96	1.44
Fe <sup>2+</sup>	0.43	0.40	0.32	0.42	0.53	0.44	0.38	0.44	0.34	0.34	0.45	0.35
Mn	0.04	0.03		0.08	0.04	0.05	0.03	0.03			0.04	
Mg	2.55	2.52	2.54	2.31	2.59	2.60	2.61	2.59	2.59	2.69	2.66	2.63
Ba	0.08	0.16	0.20	0.02	0.03	0.11	0.25	0.03	0.23	0.22	0.04	0.22
Na			0.08									
K	0.95	0.87	0.82	0.98	0.97	0.95	0.82	1.05	0.86	0.86	1.03	0.82
F	0.65	0.49	0.44	0.43	0.48	0.33	0.47		0.48	0.37	0.50	0.53
X <sub>Mg</sub>	0.86	0.86	0.89	0.84	0.83	0.86	0.87	0.85	0.88	0.89	0.86	0.88
X <sub>Ba</sub>	0.08	0.15	0.18	0.02	0.03	0.10	0.24	0.03	0.21	0.21	0.04	0.21

Примечание. 1 – флогопит из мельтейгита; 2, 3 – аннит из нефелинового сиенит-порфира; 4–13 – флогопит из уррита; 4–6 – незональные зерна среди кальцита и нефелина, 7–13 – зональные зерна. Ц – центр, Пр – промежуточная точка, Кр – край.  $X_{Mg} = Mg/(Fe + Mg)$ ;  $X_{Ba} = Ba/(Ba + Na + K)$ .

(табл. 3, зерна 1–3); содержание BaO обычно возрастает в краевых частях зерен (рис. 4, а). В биотите из слюдитов содержание BaO ниже пределов обнаружения.

Наибольший интерес представляет *бариевый флогопит*, содержащийся в уррите. В зернах слюды под электронным микроскопом наблюдается зональность, выражающаяся в присутствии светлой каймы, в некоторых зернах светлая кайма сменяется тонкой темной каемкой (рис. 4, б, з). В центральных частях зональных зерен и в мелких незональных зернах количество Si составляет 2.93–3.01 к.ф., Al – 0.93–1.04 к.ф., Ti – менее 0.02 к.ф., F – до 0.57 к.ф., Ba – 0.02–0.05 к.ф.,  $X_{Mg}$  – 0.80–0.86 (табл. 3). Содержание BaO возрастает от центра к краю зерен, достигая 8.4 мас. % или 0.25 к.ф. Ba. Одновременно возрастает количество Al,  $X_{Mg}$  (0.87–0.89), в некоторых зернах – F и снижаются содержания Si, Fe, K и Mn при слабо меняющемся содержании Mg (рис. 5, а–е). В некоторых зернах содержание Ba снижается от центра к краю (табл. 3, зерно 9), а отдельные зерна имеют сложную зональность: содержание Ba сначала возрастает, а в краевой зоне снижается (табл. 3, зерна 8, 10; рис. 4, з). Одновременно с уменьшением Ba снижается содержание Mg и возрастают содержания Fe и Mn (рис. 5, а–е).

Триоктаэдрические бариевые слюды включают киношиталит  $BaMg_3(Al_2Si_2)O_{10}(OH)_2$ , феррокиношиталит  $BaFe_3(Al_2Si_2)O_{10}(OH)_2$ , оксикиношиталит  $Ba(Mg_2Ti^{4+})(Al_2Si_2)O_{10}O_2$  и анандит  $BaFe_3^{2+}(Fe^{3+}Si_3)O_{10}S(OH)$  (Čorjakova, Kotkova, 2018). В бариевом флогопите из уррита основным изоморфным замещением является  $Ba[Al] \rightarrow K[Si]$ , что отвечает росту доли киношиталитового компонента до 24 мол. % (рис. 5, ж). В то же время, уменьшение количества Fe с ростом содержаний Ba и Al при слабо меняющемся содержании Mg позволяет предполагать также замещение по схеме  $Al[Al] \rightarrow Fe^{2+}[Si]$  (рис. 5, з). На поздней стадии проявлено замещение  $(Fe^{2+}, Mn^{2+}) \rightarrow Mg$  (рис. 5, з).



**Рис. 4.** Минералы Ва в породах массива.

*a* – зональный аннит с обогащенными Ва краями в нефелиновом сиенит-порфире; *б* – зональный флогопит в уртите; *в* – гиалофан в сростаниях с хлоритом в нефелиновом сиенит-порфире; *г* – гиалофан и целзиан (наиболее светлые участки среди гиалофана), замещающие минералы мельтейгита; *д* – прожилок, сложенный зональным бариевым полевым шпатом в биотитизированном и карбонатизированном ийолите (числами показано содержание ВаО в полевом шпате); *е* – каемки Ва-содержащего полевого шпата вокруг зерен калиевого полевого шпата и Ва-содержащие гидроксиды Mn в сиените; *ж*, *з* – генримейрит (*ж*, *з*) и баритокальцит (*з*) в ассоциации с андрадитом, замещающим перовскит, бариевый флогопит, канкринит и кальцит в уртите; числами на рис. *з* показано содержание ВаО в флогопите (зерно 10 в табл. 3); *у* – генримейрит в сростании с пиррофанитом, замещающий титаносодержащий андрадит в нефелиновом сиените. Изображения в режиме обратно-рассеянных электронов.

**Fig. 4.** Barium-bearing minerals in rocks of the massif.

*a* – zonal annite with enriched-in-Ba margins, in nepheline syenite porphyry; *b* – zonal phlogopite in urtite; *c* – hyalophane intergrowing with chlorite in nepheline syenite porphyry; *d* – veinlet of zonal barium feldspar in biotitized and carbonatized ijolite (numbers indicate the content of BaO in feldspar); *e* – rims of Ba-bearing feldspar around K-feldspar grains and Ba-bearing Mn hydroxides in syenite; *ж*, *з* – henimeyerite (*ж*, *з*) and barytocalcite (*з*) in association with andradite replacing perovskite, barium phlogopite, cancrinite, and calcite in urtite; numbers in Fig. *з* shows the content of BaO in phlogopite (grain 10 in Table 3); *u* – henimeyerite, in intergrowth with pyrophanite, replacing titanium-bearing andradite in nepheline syenite. BSE-images.

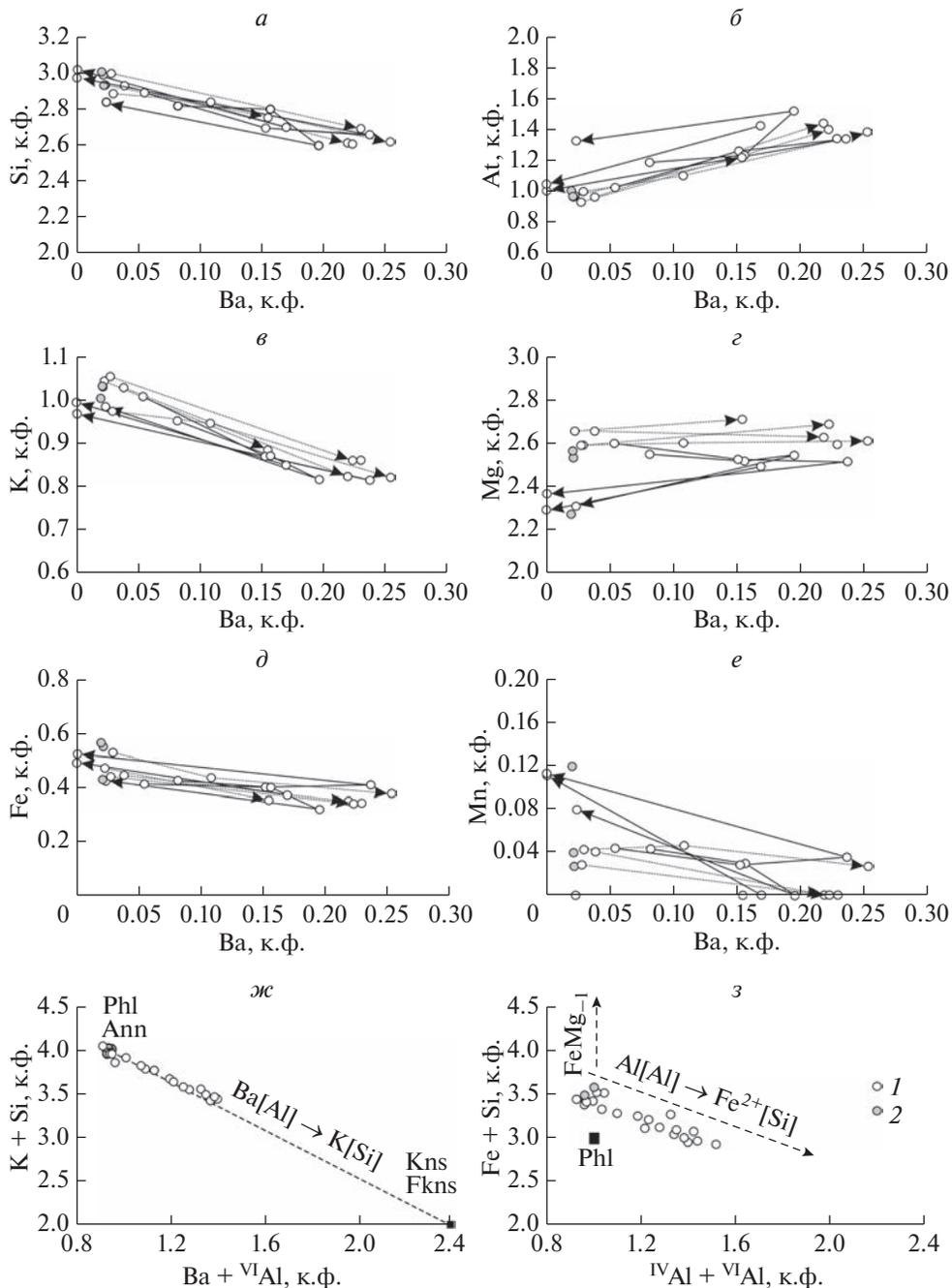


Рис. 5. Вариации химического состава Ва-флогопита в уртите.

1 – зональные зерна, 2 – незональные зерна. Точечными линиями показано изменение состава в зернах с прямой зональностью по Ва, сплошными – в зернах со сложной и обратной зональностью.

Fig. 5. Variations in chemical composition of the Ba-bearing phlogopite in urtite.

1 – zonal grains, 2 – non-zonal grains. Dotted lines show the change in composition of grains with direct zoning of Ba, continuous lines show the change in composition of grains with complicated and reverse zoning.

**Таблица 4.** Химический состав (мас. %) бариевого полевого шпата  
**Table 4.** Chemical composition (wt %) of barium-bearing feldspar

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	49.72	51.75	43.38	40.82	46.02	35.17	36.05	60.14	58.30	55.64	52.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.20	20.61	22.51	24.15	22.35	25.41	25.78	19.04	20.01	21.05	20.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.63										0.40
SrO								1.20			
BaO	18.02	14.56	27.92	32.29	24.85	37.56	36.91	4.48	8.88	12.19	14.68
K <sub>2</sub> O	10.28	11.43	6.07	4.36	7.77	2.16	1.75	15.74	14.49	12.71	11.15
Сумма	99.85	98.35	99.88	101.62	100.99	100.30	100.52	100.60	101.68	101.59	99.91
Расчет	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8	O=8
Коэффициенты в формулах											
Si	2.63	2.71	2.46	2.34	2.52	2.14	2.16	2.89	2.83	2.76	2.71
Al	1.32	1.27	1.50	1.63	1.44	1.82	1.82	1.08	1.15	1.23	1.27
Fe <sup>3+</sup>	0.03										0.02
Sr								0.03			
Ba	0.37	0.30	0.62	0.72	0.53	0.90	0.87	0.08	0.17	0.24	0.30
K	0.69	0.76	0.44	0.32	0.54	0.17	0.13	0.96	0.90	0.80	0.73
X <sub>Ba</sub>	0.35	0.28	0.59	0.69	0.50	0.84	0.87	0.08	0.16	0.23	0.29

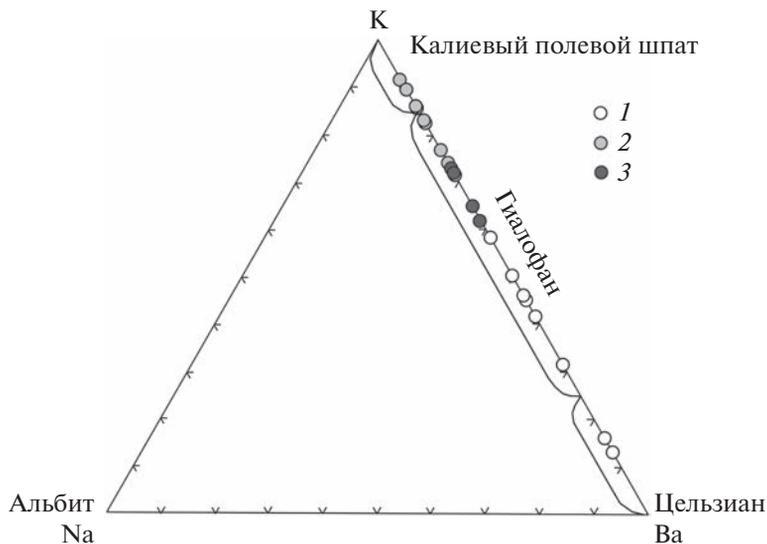
Примечание. 1, 2 – гиалофан из нефелинового сиенит-порфира; 3–7 – гиалофан (3–5) и цельзиан (6, 7) из мельтейгита; 8–11 – Ba-содержащий калиевый полевой шпат и гиалофан из ийолита. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> расчетное. X<sub>Ba</sub> = Ba/(Sr + Ba + K).

*Калиевый полевой шпат* является породообразующим минералом в нефелиновых и полевошпатовых сиенитах и второстепенным минералом в ийолитах-мельтейгитах. Количество BaO в анализах калиевого полевого шпата невысокое, составляет до 1.3 мас. % и зачастую ниже предела обнаружения. Минерал содержит также примеси Na<sub>2</sub>O до 0.4 мас. % и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 1.8 мас. %.

*Бариевый полевой шпат* обнаружен в нефелиновом сиенит-порфире в сростании с хлоритом, замещающим Ba-содержащий биотит (рис. 4, в); в виде скоплений, замещающих калиевый полевой шпат и диопсид в мельтейгите (рис. 4, з); прожилков в биотитизированном и карбонатизированном ийолите (рис. 4, д); в ассоциации с Ba-содержащими гидроксидами Mn в хлоритизированном биотитовом сиените (рис. 4, е). Количество BaO в анализах составляет от 4.5 до 37.6 мас. %, CaO – ниже пределов обнаружения, Na<sub>2</sub>O – до 0.4 мас. % (табл. 4); на долю цельзиана BaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub> приходится от 8 до 87 мол. % (рис. 6). Цельзиан образует участки среди гиалофана (рис. 4 з).

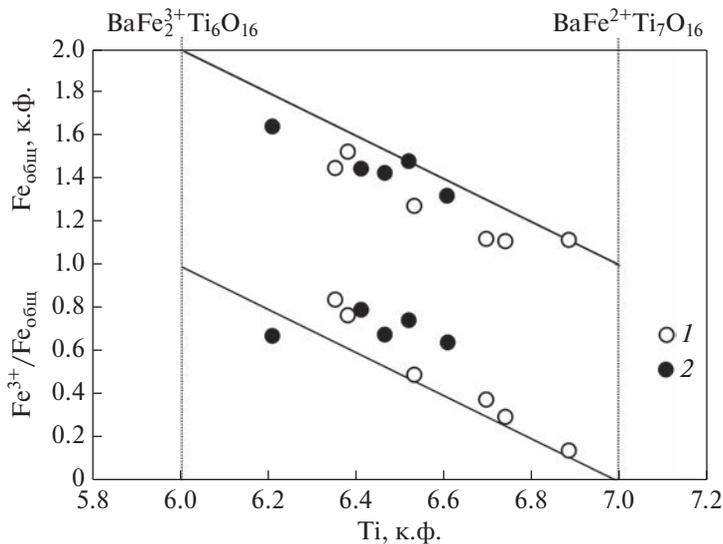
*Ba-содержащий мусковит* присутствует в уртите; барием обогащены краевые деформированные участки зерен мусковита на контакте с прожилком натролита (рис. 3, в). Содержание BaO достигает 3.5 мас. % (табл. 1, ан. 8). Примесь BaO в количестве 0.8–3.7 мас. % (до 0.10 к.ф. Ba) отмечается также в мусковите, замещающем нефелин в нефелиновых сиенитах.

*Генримейерит* обнаружен в уртите и нефелиновом сиените. Минерал представлен мелкими (до 25 мкм) зернами неправильной формы. В уртите он ассоциирует с андрадитом, замещающим перовскит, Ba-флогопит, кальцит и канкринит (рис. 4, ж, з), в нефелиновом сиените генримейерит в ассоциации с пирофанитом (рис. 4, и), титанитом или кричтонитом (не показаны на рисунках) является продуктом замещения титансодержащего андрадита.



**Рис. 6.** Состав бариевого полевого шпата на диаграмме Na–K–Ba. Границы для калиевого полевого шпата, гиалофана и цельзиана показаны в соответствии с работой (Essene et al., 2005). Бариевые полевые шпаты: 1 – из мельтейгита, 2 – ийолита, 3 – нефелинового сиенит-порфира.

**Fig. 6.** Composition of Ba-bearing feldspar on the Na–K–Ba diagram. Boundaries for K-feldspar, hyalophane, and celsian are shown according to (Essene et al., 2005). Barium-bearing feldspars: 1 – from melteigite, 2 – from ijolite, 3 – from nepheline syenite porphyry.



**Рис. 7.** Вариации химического состава генримейерита в породах массива. Генримейерит: 1 – из уррита, 2 – нефелинового сиенита. График заимствован из работы (Krmíček et al., 2011).

**Fig. 7.** Variations in chemical composition of henrimeyerite in rocks of the massif. Henmeyerite: 1 – from urtite, 2 – from nepheline syenite. Graph taken from (Krmíček et al., 2011).

**Таблица 5.** Химический состав (мас. %) генримейерита  
**Table 5.** Chemical composition (wt %) of henrimeyerite

Компо- ненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TiO <sub>2</sub>	67.29	66.62	64.90	68.82	65.67	68.09	67.49	67.21	64.92	65.25	63.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.96	1.27	0.62	1.21	1.32			0.47			
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>									1.03	1.37	1.44
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>											1.55
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>										1.44	1.43
FeO <sub>общ</sub>	9.97	11.68	13.95	10.36	13.47	9.93	13.79	12.09	12.89	13.24	15.00
BaO	19.54	20.67	19.24	19.74	18.63	19.67	18.43	18.20	19.19	16.39	18.49
Сумма	97.76	100.24	98.71	100.13	99.09	97.69	99.71	97.97	98.03	97.69	101.01
Расчет	Σкат = 8										
Коэффициенты в формулах											
Ti	6.74	6.53	6.38	6.69	6.35	6.88	6.52	6.61	6.46	6.41	6.21
Al	0.15	0.19	0.10	0.18	0.20			0.07			
Fe <sup>3+</sup>	0.33	0.63	1.17	0.42	1.22	0.16	1.11	0.85	0.97	1.15	1.11
V									0.11	0.14	0.15
La											0.07
Ce										0.07	0.07
Fe <sup>2+</sup>	0.78	0.64	0.35	0.70	0.23	0.96	0.37	0.47	0.45	0.29	0.53
Ba	1.02	1.06	0.98	1.00	0.94	1.04	0.93	0.93	1.00	0.84	0.95

Примечание. Генримейерит: 1–6 – из уррита, 7–11 – из нефелинового сиенита. Коэффициенты в формулах рассчитаны на 8 катионов в позиции В. Расчет Fe<sup>3+</sup> выполнен из условия электронейтральности формулы (Droop, 1987).

Проанализированные зерна неоднородны по химическому составу, который отклоняется от идеальной формулы генримейерита  ${}^A\text{Ba}^B(\text{Ti}_7\text{Fe}^{2+})\text{O}_{16}$  (Mitchell et al., 2000). Для генримейерита из Большетагинского массива (табл. 5) характерен дефицит Ti и присутствие в значительном количестве Fe<sup>3+</sup> по сравнению с идеальной формулой, т.е. минерал принадлежит к серии твердых растворов гептатитанат  $\text{BaFe}^{2+}\text{Ti}_7\text{O}_{16}$  – гексатитанат  $\text{BaFe}_2^{3+}\text{Ti}_6\text{O}_{16}$  (Mitchell et al., 2000). К генримейериту более близок по химическому составу минерал из уррита, тогда как в минерале из нефелинового сиенита выше доля гексатитанатового компонента (рис. 7). Генримейерит из уррита содержит примесь Al, тогда как минерал из нефелинового сиенита – примеси V, Ce и La (табл. 5).

Во всех изученных породах массива присутствует акцессорный *барит* (см. предыдущий раздел). Кальцит в уррите содержит вросстки карбоната Ba и Ca (*баритокальцит*?) (табл. 2, ан. 5; рис. 4, з). Карбонат Ba и Ca в сростаниях с бурбанкитом (табл. 2, ан. 4), баритом и стронцианитом обнаружен также в карбонатите.

Ва-содержащие *гидроксиды Mn* присутствуют в виде скоплений в биотитовом нефелиновом сиените, где ассоциируют с Ва-содержащим полевым шпатом, замещающим зерна калиевого полевого шпата (рис. 4, е). Содержание главных компонентов в анализах гидроксидов сильно варьирует: MnO<sub>2</sub> 52.4–76.4, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.7–25.8, BaO 3.2–10.2, CaO 3.5–5.2, сумма оксидов 82.7–90.2 мас. %.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное изучение распределения Sr и Ba между щелочным расплавом и водно-солевым флюидом (Сук, Котельников, 2011) показало, что эти элементы преимущественно распределяются в расплав и, соответственно, входят в состав кристал-

лизующихся на магматической стадии породообразующих и акцессорных минералов. В щелочных породах Большешетагнинского массива главными концентраторами стронция на магматической стадии являлись кальцит и фторапатит. Содержание Sr в этих минералах из разных типов пород примерно одинаковое и достигает 1.9 мас. %. Зональность по Sr в зернах фторапатита не отмечена; это позволяет предполагать, что в процессе кристаллизации накопление Sr в остаточных расплавах не происходило.

Концентраторами бария на магматической стадии в ийолите, мельтейгите и уртите являются флогопит и биотит, а в нефелиновых сиенитах также калиевый полевошпат. На образование Ba-содержащих биотита и флогопита на магматической стадии указывает их более ранняя кристаллизация по отношению к титансодержащему андрадиту (рис. 2, *з–е*). Зональность, проявленная в биотите и флогопите преимущественно выражается в росте содержания Ba в краевой зоне, что указывает на постепенное увеличение концентрации бария в остаточном расплаве. Как следует из анализов флогопита из уррита, рост содержания Ba не сопровождался скачкообразным изменением содержания других компонентов (рис. 5), что указывало бы на смену условий минералообразования, следовательно, изменение состава слюды связано, вероятнее всего, с кристаллизационной дифференциацией. Признаком, указывающим на накопление Ba в остаточном расплаве является также присутствие микровключений баритокальцита (?) в интерстициальном кальците, ассоциирующемся с флогопитом в уртите.

Бариевый флогопит, член изоморфного ряда флогопит-киношпиталит, нередко встречается в бедных кремнеземом породах повышенной щелочности: он обычен для кимберлитов (Опарин и др., 2017; Beard et al., 2000; Dongre, Tappe, 2019; Zurevinski, Mitchell, 2011 и др.), карбонатитов (Gaspar, Wyllie, 1982; Giebel et al., 2019; Rampilova et al., 2021), обнаружен в оливините Гулинского ультраосновного–щелочного массива (Когарко и др., 2012), фергусите высококалийевого базальтоидного комплекса Ю-В Памира (Соловова и др., 2009), мелилититах (Doroshkevich et al., 2019) и айлликитах (Соловова и др., 2009). Во всех указанных породах бариевый флогопит образуется на поздних стадиях кристаллизации. В уртите Большешетагнинского массива образование флогопита условлено, по-видимому, низкой активностью кремнезема в расплаве на ранней стадии кристаллизации, что препятствовало образованию клинопироксена, а магнезиальный состав слюды указывает на повышенную  $f_{O_2}$  на поздних стадиях кристаллизации.

Большинство Sr- и Ba-содержащих минералов в щелочных породах Большешетагнинского массива образуются на постмагматической стадии. Это стрональсит, генримейерит, Sr-содержащий фторкальциопироксид, Sr- и Ba-содержащий мусковит, бариевые полевые шпаты и другие минералы (рис. 8).

Стрональсит  $SrNa_2Al_4Si_4O_{16}$  является сравнительно распространенным акцессорным минералом в щелочных породах. Как самостоятельный минерал и в виде твердого раствора с банальситом  $BaNa_2Al_4Si_4O_{16}$  он обнаружен в измененных куспидин-мелилитовых ксенолитах среди нефелиновых сиенитов Хибинского комплекса (Хомяков и др., 1990; Лиферович и др., 2005); пироксенитах Жидойского ультраосновного щелочного массива в Южной Сибири (Конева, 1996), урритах и нефелиновых сиенитах массивов Сахарйок и Гремяха-Вырмес (Liferovich, Mitchell, 2006), мелилитовых породах и ийолите комплекса Турьего Мыса (Лиферович и др., 2005); ийолитах и карбонатитах комплекса Прери Лейк в Канаде, фельдшпатоидных сиенитах комплекса Пилансберг в Южной Африке (Liferovich, Mitchell, 2006), ийолитах интрузива Чик-Хем в Туве (Спиридонов и др., 2018). Образование стрональсита связывается с пост-

**Рис. 8.** Схема последовательности кристаллизации минералов в щелочных породах Большешетагнинского массива.

**Fig. 8.** Scheme of the consequence of crystallization of minerals in alkaline rocks of the Bolshetagninskii massif.

Минерал	Стадии		
	Магматическая	Пневмато-литовая, $T > 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	Гидротермальная $T < 400\text{ }^{\circ}\text{C}$
Диопсид-геденбергит/титан-авгит	-----		
Нефелин	-----		
Перовскит	-----		
Флогопит (Ba)	-----		
Аннит (Ba)	-----		
Титаномagnetит	-----		
Калиевый полевой шпат (Ba)	-----		
Кальцит (Sr)	-----		
Фторапатит (Sr)	-----		
Флюорит (Sr)	-----		
Баритокальцит (Ba)	-----		
Титансодержащий андрадит	-----		
Бадделеит	-----		
Циркон	-----		
Фторкальциопирохлор (Sr)	-----		
Магнетит		-----	
Канкринит		-----	
Стрональсит (Sr)		-----	
Мусковит (Sr, Ba)		-----	
Гроссуляр-андрадит		-----	
Эпидот (Sr)		-----	
Титанит		-----	
Генримейерит (Ba)		-----	
Кричтонит (Sr)		-----	
Манганильменит		-----	
Рутил/анатаз		-----	
Барит (Ba, Sr)		-----	
Целестин (Sr)		-----	
Натролит			-----
Хлорит			-----
Гиалофан/цельзиан (Ba)			-----
Бастнезит/синхизит (Sr)			-----
Кварц			-----
Гидроксиды Ми (Ba)			-----
Гётит			-----

магматическим изменением нефелина под воздействием щелочного флюида (Liferovich, Mitchell, 2006).

В уртите Большетагнинского массива стрональсит также является продуктом постмагматического изменения нефелина: он ассоциирует с канкринитом и мусковитом и является более ранним минералом по отношению к натролиту (рис. 3, *в*). При этом преимущественно стрональсит образуется по нефелину, находящемуся среди граната (рис. 3, *а, б*). Это позволяет предполагать, что причиной замещения нефелина стрональситом послужил рост концентрации Sr во флюиде вследствие высвобождения стронция из кальцита, участвовавшего в образовании граната (и канкринита). Это же явилось причиной кристаллизации стронцианита среди канкринита. Отсутствие банальсита указывает на очень низкую концентрацию Ba во флюиде, отделявшемся при кристаллизации уррита. Обнаружение стрональсита только в уртите объясняется, по видимому, высокой активностью  $\text{Na}^+$  на постмагматической стадии формирования этой породы. При пониженной активности  $\text{Na}^+$  стронций входил в состав других постмагматических минералов – кричтонита, эпидота, мусковита, барита, целестина.

Генримейрит, как самостоятельный минерал, впервые был описан в кальцит-доломитовом карбонате Ковдорского массива (Mitchell et al., 2000). Генримейрит обнаружен также в Себляврском карбонатитовом массиве, Кольский п-ов (Сорохтина, 2000), нефелин-сиенитовых пегматитах Монтаны, США (Chakhmouradian, Mitchell, 2002), метасоматизированных мантийных ксенолитах Восточной Антарктиды (Kogarko et al., 2007), лампроитах Чехии (Krmíček et al., 2011). Бариевый прайдерит выявлен в карбонатитах Ковдорского массива (Журавлева и др., 1978), рихчорритах Хибинского массива (Меньшиков и др., 1979), ультраосновных лампрофирах Канады (Platt, 1994), сиенитах и щелочно-сиенитовых пегматитах Маломурунского массива, Алданский щит (Mitchell, Vadykin, 1993; Шахмурадян, Евдокимов, 1997) и Монтаны, США (Chakhmouradian, Mitchell, 1999), лампроитах Восточной Индии (Maitra, Bhattacharyya, 2015). Во всех этих проявлениях генримейрит встречается в виде каймы вокруг минералов ранних стадий или является продуктом их замещения.

В уртите из Большетагнинского массива генримейрит обнаружен в ассоциации с андрадитом, что позволяет связывать его образование с высвобождением титана из титансодержащего андрадита, перовскита или титаномагнетита и бария из Ba-содержащего флогопита в результате замещения этих минералов андрадитом (рис. 4, *ж*). Образование генримейрита, а не прайдерита, свидетельствует о низкой активности  $\text{K}^+$  во флюиде, что обусловлено одновременной кристаллизацией каемок низкобариевого флогопита вокруг бариевого флогопита (рис. 4, *з*; зерна с обратной зональностью на рис. 5). Замещение титансодержащего андрадита в нефелиновом сиените генримейритом в ассоциации с пирофанитом (рис. 4, *и*) и кричтонитом (не показано на рисунке) указывает на накопление Ba наряду с Sr и Mn во флюидной фазе, также, вероятно, вследствие перекристаллизации ранних минеральных ассоциаций.

Наиболее высокие концентрации Ba в Большетагнинском массиве присущи щелочным породам, содержащим бариевые полевые шпаты. Гиалофан и цельзиан являются сравнительно редкими минералами в щелочных комплексах. Первично магматические гиалофан и цельзиан выявлены в полевошпатовом уртите Хибинского массива (Иванюк и др., 2009) и нефелиновых сиенитах и ювитах из щелочных массивов Тувы (Козулина, 2012). Согласно данным из работы (Essene et al., 2005), гиалофан и бариевый санидин обнаружены в анализититах, фонолитах, мончиките, нефелините, шонкинитах и лейцититах. Как постмагматические минералы, гиалофан, цельзиан, парцельзиан присутствуют в ийолитах, глиммерите и щелочном пироксените комплекса Прери Лейк, Канада (Liferovich et al., 2006); K-Ba полевой шпат и цельзиан обнаружены в метаморфических породах и метасоматитах вблизи миаскитов Ильменогорского массива (Чередниченко, Дубинина, 2017).

В Большетагнинском массиве гиалофан и более редкий цельзиан встречаются в щелочных породах в виде скоплений в ассоциации с хлоритом, а также слагают прожилки в биотитизированных, карбонатизированных и калишпатизированных ийолитах (рис. 4, *в–д*), т.е. образуются на низкотемпературной гидротермальной стадии. На повышенную активность  $Ba^{2+}$  в гидротермальных растворах указывает, кроме того, обогащение барием краевых деформированных зон в зернах мусковита на контакте с прожилками натролита (рис. 3, *в*) и отложение на завершающей стадии Ва-содержащих гидроксидов Mn (рис. 4, *е*). Ассоциация гиалофана с хлоритом позволяет предполагать, что причиной образования К-Ва полевых шпатов являлось разложение первично-магматических Ва-содержащих слюд под воздействием низкотемпературных гидротермальных растворов, мигрировавших по зонам катаклаза и трещинам в породах массива. Важную роль в высвобождении Ва из первично-магматических флогопита/аннита и росте его концентрации в гидротермальных растворах могли играть также предшествовавшие хлоритизации процессы карбонатизации, калишпатизации и перекристаллизации слюды в экзоконтактовом ореоле карбонатитового штока. Присутствие в измененных щелочных породах массива бариевых полевых шпатов свидетельствует о невысокой, в целом, активности  $SO_4^{2-}$  в гидротермальных растворах.

## ВЫВОДЫ

1. Образование минералов Sr и Ba в щелочных силикатных породах Большетагнинского массива являлось многостадийным процессом. На магматической стадии основными концентраторами стронция являлись кальцит и фторапатит, а бария – преимущественно магнезиально-железистые слюды. Отсутствие зональности по Sr в зернах апатита указывает на то, что при кристаллизации не происходило накопление Sr в остаточных щелочных расплавах. Барий, напротив, накапливался в остаточных расплавах, на что указывает рост его содержания в краевых частях зерен флогопита/аннита и присутствие включений карбоната Ba и Ca в интерстициальном кальците, ассоциирующем с флогопитом в уртите.

2. Наиболее разнообразные минералы стронция и бария образовались в щелочных породах Большетагнинского массива на высокотемпературной постмагматической стадии. Это – стрональсит, стронцианит, целестин, барит, генримейрит, кричтонит, а также Sr-содержащий фторкальциопирохлор, Sr-содержащие мусковит и эпидот, образование которых связано, преимущественно, с процессами замещения минералов магматической стадии при участии флюидов, отделявшихся при кристаллизации щелочных расплавов. Преобладание Sr-содержащих минералов на этой стадии указывает на низкую концентрацию бария во флюидной фазе.

3. Карбонатизация и калишпатизация, проявившиеся в экзоконтактовом ореоле карбонатитового штока, и последующее воздействие на щелочные породы массива низкотемпературных гидротермальных растворов, мигрировавших по зонам катаклаза и трещинам, вызвали разложение первично-магматических Ва-содержащих слюд. Это послужило причиной образования на некоторых участках в щелочных породах скоплений и прожилков гиалофана и цельзиана, замещение мусковита барийсодержащим мусковитом и на заключительной стадии отложение Ва-содержащих гидроксидов марганца. Присутствие гиалофана и цельзиана в измененных щелочных силикатных породах является особенностью Большетагнинского массива, указывающей на низкую активность аниона  $SO_4^{2-}$  в гидротермальных растворах на низкотемпературной стадии.

При выполнении работы задействовались оборудование ЦКП “Геодинамика и геохронология” Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682. Изучение химического состава минералов в выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту АААА-А21-121011390002-2.

Авторы выражают искреннюю признательность анонимному рецензенту за замечания и рекомендации, послужившие улучшению качества статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Е.Д., Кононова В.А., Свешникова Е.В., Яшина Р.М. Магматические горные породы. Щелочные породы. М.: Наука, **1984**. 415 с.
- Гладкоуб Д.П., Мазукабзов А.М., Станевич А.М., Донская Т.В., Мотова З.Л., Ванин В.А. Возрастные уровни и геодинамические режимы накопления докембрийских толщ Урикско-Ийского грабена, юг Сибирского кратона // Геотектоника. **2014**. № 5. С. 17–31.
- Журавлева Л.Н., Юркина К.В., Рябева Е.Г. Прайдерит – первая находка в СССР // Доклады АН СССР. **1978**. Т. 239. № 2. С. 435–438.
- Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Коноплева Н.Г., Калашиников А.О., Корчак Ю.А., Селиванова Е.А., Яковенчук В.Н. Породообразующие полевые шпаты Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров, Россия) // ЗРМО. **2009**. № 6. С. 1–17.
- Капустин Ю.Л. Минералогия карбонатитов. Л.: Наука, **1971**. 290 с.
- Когарко Л.Н., Рябчиков И.Д., Кузьмин Д.В. Высокобариевая слюда в оливинитах Гулинского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Сибирь) // Геология и геофизика. **2012**. Т. 53. № 11. С. 1572–1579.
- Кожевников О.К., Кухринкова Н.В., Туголукова Г.А. Больше-Тагнинский массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов / Эндегенные полезные ископаемые Саяно-Байкальской горной области. Иркутск: Вост.-Сиб. книжное изд-во, **1974**. С. 134–163.
- Козулина Т.В. Состав пороодообразующих минералов щелочных массивов Центрального Сангилены, Юго-Восточная Тува / Современные проблемы магматизма и метаморфизма. Мат. Всероссийск. конф. Т. 1. СПб.: Изд-во СПбГУ, **2012**. С. 275–277.
- Конева М.А. Банальсит и стрональсит из пироксенитов Жидойского массива // ЗВМО. **1996**. № 2. С. 103–105.
- Лиферович Р.П., Митчелл Р.Х., Шпаченко А.К., Зозуля Д.Р. Акцессорный минерал нефелиновых сиенитов – твердый раствор банальсит-стрональсит / Минералогия во всем пространстве сего слова. Труды II Фермановской научной сессии Кольского отделения РМО. Апатиты: Изд-во “K & M”, **2005**. С. 54–57.
- Меньшиков Ю.П., Полежаева Л.И., Ганнибал Л.Ф. Калиевый и бариевый прайдериты из Хибинского щелочного массива / Новые данные о минералах Кольского полуострова. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, **1979**. С. 18–24.
- Отарин Н.А., Олейников О.Б., Бабушкина С.А. Флогопит из трубок Манчары и Апрельская (Хомпу-Майское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // Отечественная геология. **2017**. № 5. С. 37–44.
- Пикалова В.С. Геолого-экономическая оценка нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд на примере Большетагнинского месторождения / Автореф. дис. ... канд. г.-м.н. М., **2017**. 24 с.
- Соловова И.П., Гирнис А.В., Рябчиков И.Д., Кононова Н.Н. Механизмы образования высокобариевого флогопита и высокостронциевого апатита на заключительных стадиях эволюции щелочных магм // Геохимия. **2009**. № 6. С. 613–627.
- Сорохтина Н.В. Минералогия карбонатитов в зонах контакта с ультраосновными, щелочными породами и фенитами Себьяврского массива. Автореф. дис. ... канд. г.-м.н. М., 2000. 20 с.
- Спиридонов Э.М., Путинцева Е.В., Кужугет Р.В., Монгуш А.А. Стрональсит  $\text{SrNa}_2[(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)_2]$  и ассоциирующие послемагматические амфиболы, гранаты и канкринит кальцитовых ийолитов интрузива Чик-Хем, Тува / Геология, магматизм и металлогения Центра Азии. 2018: Рудно-магматические системы Сангилены (щелочные интрузивы, карбонатиты). Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, **2018**. С. 108–113.
- Сук Н.И., Котельников А.Р. Экспериментальное изучение распределения REE, Ва и Sr между силикатным расплавом и низкоконцентрированным водно-солевым флюидом при  $T = 1250\text{ }^\circ\text{C}$  и  $P = 2\text{ кбар}$  // Вестник ОНЗ РАН. **2011**. Т. 3. NZ6092.
- Фролов А.А., Белов С.В. Комплексные карбонатитовые месторождения Зиминского рудного района (Восточный Саян, Россия) // Геология рудн. месторожд. **1999**. Т. 41. № 2. С. 109–130.
- Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России. М.: НИИ-Природа, **2003**. 494 с.
- Хомяков А.П., Шпаченко А.К., Полежаева Л.И. Мелилитовая и редкоземельно-фосфорная минерализация г. Намуайв (Хибины) / Щелочной магматизм северо-восточной части Балтийского щита. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, **1990**. С. 106–119.
- Чередищенко С.В., Дубинина Е.В. Бариевые полевые шпаты Ильмено-Вишневогорского комплекса (Южный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. **2017**. № 8. С. 17–22.
- Шахмурадян А.Р., Евдокимов М.Д. Титановые и циркониевые минералы щелочно-сиенитовых пегматитов Маломурунского массива, Якутия // ЗВМО. **1997**. № 3. С. 32–42.

**Strontium and Barium Minerals in Alkaline Rocks of the Bolshetagninsky Ijolite-Syenite-Carbonatite Massif (Southwestern Margin of the Siberian Craton)**

**V. B. Savelyeva<sup>a, \*</sup>, E. P. Bazarova<sup>a, \*\*</sup>, and E. A. Khromova<sup>b, \*\*\*</sup>**

<sup>a</sup>*Institute of the Earth's Crust Siberian Branch RAS, Lermontova st., 128, Irkutsk, 664033 Russia*

<sup>b</sup>*Geological Institute N.L. Dobretsov Siberian Branch RAS, Sakhyanova st., 6a, Ulan-Ude, 670047 Russia*

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

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

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

The paper displays data on Sr- and Ba-bearing minerals occurring in melteigite, ijolite, urtite, and nepheline syenite of the Bolshetagninsky ijolite-syenite-carbonatite massif. At the magmatic stage, strontium enters as an isomorphous admixture into calcite (SrO = 0.5–1.9 wt %) and fluorapatite (SrO = 0.6–2.6 wt %), while barium mainly enters in phlogopite and annite. Zonal phlogopite in urtite contains up to 8.4 wt % BaO (24 mol. % of kinoshitalite component); interstitial calcite in the same rock contains small ingrowths of barytocalcite. Stronalsite, strontianite, crichtonite, henrimeyerite, barite, celestite, Sr-bearing fluorcalciopyrochlore, Sr-bearing muscovite, and epidote have crystallized at the high-temperature post-magmatic stage. In the exocontact zone of the carbonatite stock, ijolite and nepheline syenite underwent biotitization, carbonatization, and K-feldspathization, followed by chloritization and formation, in some spots, of hyalophane and celsian segregations and veinlets. The formation of Ba-bearing muscovite and Ba-bearing manganese hydroxides took also place at the low-temperature hydrothermal stage. The presence of hyalophane and celsian in altered alkaline rocks is a peculiarity of the Bolshetagninsky massif, indicating the low activity of  $\text{SO}_4^{2-}$  in hydrothermal solutions.

**Keywords:** Bolshetagninsky massif, Uriksko-lysky graben, barium phlogopite, stronalsite, henrimeyerite, hyalophane, 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).
- Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Gieré R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: Nomenclature. *Canad. Miner.* **2010**. Vol. 48. P. 673–698.
- Beard A.D., Downes H., Hegner E., Sablukov S.M. Geochemistry and mineralogy of kimberlites from the Arkhangelsk Region, NW Russia: evidence for transitional kimberlite magma types. *Lithos.* **2000**. Vol. 51. P. 47–73.
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H. Primary, agpaite and deuteric stages in the evolution of accessory Sr, REE, Ba and Nb-mineralization in nepheline-syenite pegmatites at Pegmatite Peak, Bearpaw Mts, Montana. *Miner. Petrol.* **1999**. Vol. 67. P. 85–110.
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H. The mineralogy of Ba- and Zr-rich alkaline pegmatites from Gordon Butte, Crazy Mountains (Montana, USA): Comparisons between potassic and sodic agpaite pegmatites. *Contrib. Miner. Petrol.* **2002**. Vol. 143. P. 93–114.
- Cherednichenko S.V., Dubinina E.V. Barium feldspars of the Ilmeno-Vishnegorsky complex (Southern Urals). *Bull. IG Komi SC UB RAS.* **2017**. N 8. P. 17–22 (in Russian).
- Čopjakova R., Kotkova J. Composition of barian mica in multiphase solid inclusions from orogenic garnet peridotites as evidence of mantle metasomatism in a subduction zone setting. *Contrib. Miner. Petrol.* **2018**. Vol. 173. P. 106.
- Dongre A., Tappe S. Kimberlite and carbonatite dykes within the Premier diatreme root (Cullinan Diamond Mine, South Africa): New insights to mineralogical-genetic classifications and magma  $\text{CO}_2$  degassing. *Lithos.* **2019**. Vol. 338–339. P. 155–173.
- Doroshkevich A.G., Chebotarev D.A., Sharygin V.V., Prokopyev I.R., Nikolenko A.M. Petrology of alkaline silicate rocks and carbonatites of the Chuktukon massif, Chadobets upland, Russia: Sources, evolution and relation to the Triassic Siberian LIP. *Lithos.* **2019**. Vol. 332–333. P. 245–260.
- Droop G.T.R. A general equation for estimating  $\text{Fe}^{3+}$  concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Miner. Mag.* **1987**. Vol. 51. P. 431–435.

- Frolov A.A., Belov S.V. Complex carbonatite deposits of the Ziminsky ore region (Vostochny Sayan, Russia). *Geol. Ore Deposits*. **1999**. Vol. 41. N 2. P. 109–130 (in Russian).
- Frolov A.A., Tolstov A.V., Belov S.V. Carbonatite deposits in Russia. Moscow: NIA–Priroda, **2003**. 494 p. (in Russian).
- Essene E.J., Claflin C.L., Giorgetti G., Mata P.M., Peacor D.R., Árkai P., Rathmell M.A. Two-, three- and four-feldspar assemblages with hyalophane and celsian: implications for phase equilibria in BaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>–CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>–NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>–KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. *Eur. J. Miner.* **2005**. Vol. 17. P. 515–535.
- Gaspar J.C., Wyllie P.J. Barium phlogopite from the Jacupiranga carbonatite, Brazil. *Amer. Miner.* **1982**. Vol. 67. P. 997–1000.
- Giebel R.J., Parsapoor A., Walter B.F., Braunger S., Marks M.A.W., Wenzell T., Markl G. Evidence for Magma–Wall rock interaction in carbonatites from the Kaiserstuhl volcanic complex (Southwest Germany). *J. Petrol.* **2019**. Vol. 60. N 6. P. 1163–1194.
- Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Donskaya T.V., Motova Z.L., Vanin V.A. Age levels and geodynamic regimes of accumulation of the Precambrian strata of the Urik-Iya graben, south of the Siberian craton. *Geotectonics*. **2014**. N 5. P. 17–31 (in Russian).
- Ivanyuk G.Yu., Pakhomovsky Ya.A., Konopleva N.G., Kalashnikov A.O., Korchak Yu.A., Selivanova E.A., Yakovenchuk V.N. Rock-forming feldspars of the Khibiny alkaline massif (Kola Peninsula, Russia). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2009**. N 6. P. 1–17 (in Russian).
- Kapustin Yu.L. Mineralogy of carbonatites. Leningrad: Nauka, **1971**. 290 p. (in Russian).
- Khomyakov A.P., Shpachenko A.K., Polezhaeva L.I. Melilitic and rare earth-phosphorus mineralization of Namuaiv (Khibiny). In: *Alkaline magmatism of the northeastern part of the Baltic Shield*. Apatity: Publishing House of the KSC RAS, **1990**. P. 106–119 (in Russian).
- Kogarko L.N., Kurat G., Ntaflou T. Henrymeyerite in the metasomatized upper mantle of eastern Antarctica. *Canad. Miner.* **2007**. Vol. 45. P. 497–501.
- Kogarko L.N., Ryabchikov I.D., Kuzmin D.V. High-barium mica in olivinites of the Guli massif (Maimcha-Kotui province, Siberia). *Russian Geol. Geophys.* **2012**. Vol. 53. N 11. P. 1572–1579 (in Russian).
- Koneva M.A. Banalsite and stronalsite from the pyroxenites of the Zhidoi massif. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1996**. N 2. P. 103–105 (in Russian).
- Kozhevnikov O.K., Kukhrinkova N.V., Tugolukova G.A. Bolshe-Tagninsky massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites. In: *Endogenous minerals of the Sayano-Baikal mountain region*. Irkutsk: East Siberian Book Publishing House, **1974**. P. 134–163 (in Russian).
- Kozulina T.V. Composition of rock-forming minerals in alkaline massifs of the Central Sangilen, South-Eastern Tuva. In: *Modern problems of magmatism and metamorphism*. Proc. All-Russian Conference. Vol. 1. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University, **2012**. P. 275–277 (in Russian).
- Krmíček L., Cempírek J., Havlín A., Přichystal A., Stanislav Houzar S., Krmíčková M., Gadas P. Mineralogy and petrogenesis of a Ba–Ti–Zr-rich peralkaline dyke from Šebkovice (Czech Republic): Recognition of the most lamproitic Variscan intrusion. *Lithos*. **2011**. Vol. 121. P. 74–86.
- Liferovich R.P., Mitchell R.Kh., Shpachenko A.K., Zozulya D.R. An accessory mineral of nepheline syenites is a solid solution of banalsite–stronalsite. In: *Mineralogy throughout the entire space of this word. Proc. II Fersman Scientific Session of the Kola Branch of the Russian Mineralogical Society*. Apatity: Publishing House “K & M”, **2005**. P. 54–57 (in Russian).
- Liferovich R.P., Mitchell R.H. Paragenesis and composition of banalsite, stronalsite, and their solid solution in nepheline syenite and ultramafic alkaline rocks. *Canad. Miner.* **2006**. Vol. 44. P. 929–942.
- Maitra M., Bhattacharyya A. Report of Ba-Fe-titanate in lamproite dyke of Nonia Nala, Barakar formation, Gondwana coalfield, Eastern India and its significance. *J. Geol. Soc. India*. **2015**. Vol. 86. P. 295–299.
- Menshikov Yu.P., Polezhaeva L.I., Hannibal L.F. Potassium and barium priderites from the Khibiny alkaline massif. In: *New data on the minerals of the Kola Peninsula*. Apatity: Kola Branch of the USSR Acad. Sci., **1979**. P. 18–24 (in Russian).
- Mitchell R.H., Vladykin N.V. Rare earth element-bearing tausonite and potassium barium titanates from the Little Murun potassic alkaline complex, Yakutia, Russia. *Miner. Mag.* **1993**. Vol. 57. P. 651–664.
- Mitchell R.H., Yakovenchuk V.N., Chakhmouradian A.R., Burns P.C., Pakhomovsky Ya.A. Henrymeyerite, a new hollandite–type Ba-Fe titanate from the Kovdor complex, Russia. *Canad. Miner.* **2000**. Vol. 38. P. 617–626.
- Oparin N.A., Oleinikov O.B., Babushkina S.A. Phlogopite from the Manchara and Aprelskaya pipes (Khompu-Maya kimberlite field, Central Yakutia). *Otechestvennaya geologiya*. **2017**. N 5. P. 37–44 (in Russian).
- Pikalova V.S. Geological and economic assessment of a new potentially industrial type of niobium ores on the example of the Bolshetagninskoye deposit. Ph. D. thesis syn. Moscow: VIMS, **2017**. 24 p. (in Russian).
- Platt R.G. Perovskite, loparite and Ba-Fe hollandite from the Schryburt Lake carbonatite complex, northwestern Ontario, Canada. *Miner. Mag.* **1994**. Vol. 58. Is. 390. P. 49–57.

Rampilova M., Doroshkevich A., Shrinivas Viladkar S., Zubakova E. Mineralogy of Dolomite Carbonatites of Sevathur Complex, Tamil Nadu, India. *Minerals*. **2021**. Vol. 11. P. 355.

Solovova I.P., Girnis A.V., Ryabchikov I.D., Kononkova N.N. Mechanisms of formation of high-barium phlogopite and high-strontium apatite at the final stages of evolution of alkaline magmas. *Geochemistry*. **2009**. N 6. P. 613–627 (in Russian).

Sorokhtina N.V. Mineralogy of carbonatites in zones of contact with ultrabasic, alkaline rocks and fenites of the Sebyavr massif. Ph. D. thesis syn. Moscow, **2000**. 20 p. (in Russian).

Spiridonov E.M., Putintseva E.V., Kuzhuget R.V., Mongush A.A. Stronalsite  $\text{SrNa}_2[(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)_2]$  and associated postmagmatic amphiboles, garnets and cancrinite in calcite ijolites of the Chik-Khem intrusion, Tuva. In: *Geology, magmatism and metallogeny of Central Asia. 2018: Ore-magmatic systems of Sangilen (alkaline intrusions, carbonatites)*. Kyzyl: TuvIKOPR SB RAS, **2018**. P. 108–113 (in Russian).

Suk N.I., Kotelnikov A.R. Experimental study of the distribution of REE, Ba and Sr between a silicate melt and a low-concentration water-salt fluid at  $T = 1250^\circ\text{C}$  and  $P = 2$  kbar. *Bull. ESB RAS*. **2011**. Vol. 3. NZ6092 (in Russian).

Shakhmuradyan A.R., Eydokimov M.D. Titanium and zirconium minerals of alkaline-syenite pegmatites of the Malomurun massif, Yakutia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1997**. N 3. P. 32–42 (in Russian).

Zhuravleva L.N., Yurkina K.V., Ryabeva E.G. Praiderite is the first find in the USSR. *Dokl. Acad. Sci. USSR*. **1978**. Vol. 239. N 2. P. 435–438 (in Russian).

Zurevinski S.E., Mitchell R.H. Highly evolved hypabyssal kimberlite sills from Wemindji, Quebec, Canada: insights into the process of flow differentiation in kimberlite magmas. *Contrib. Miner. Petrol.* **2011**. Vol. 161. P. 765–776.