

УДК 549.02:552.33

DOI: 10.24930/2500-302X-2026-26-3-682-695

Роль взаимодействия “кристалл–расплав” в формировании рудной минерализации щелочных сиенитов массива Бурпала (З. Прибайкалье): результаты экспериментов

Д. А. Чеботарев^{1,2}, А. Г. Дорошкевич^{1,2}, А. Е. Старикова^{1,2}, И. А. Избродин^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: chebotarev@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 13.01.2026 г., принята к печати 13.04.2026 г.

Объект исследования. Щелочные и нефелиновые рудоносные сиениты массива Бурпала (Западное Прибайкалье). **Цель.** Экспериментально смоделировать процессы взаимодействия “кристаллизующаяся масса–расплав” на ранних магматических стадиях формирования сиенитовых тел массива Бурпала для выявления механизмов рудоконцентрирования. **Материалы и методы.** Экспериментальное моделирование взаимодействия кристаллизующейся массы (щелочной сиенит массива Бурпала) с межкристаллическим щелочным насыщенным летучими расплавом (в виде стекла, полученного предварительным плавлением рудоносного нефелинового сиенита массива Бурпала) было проведено в гидротермальных автоклавах с системой быстрой закалки при 750°C и 200 МПа. Исходные вещества и продукты экспериментов анализировались методами СЭМ и ЛА-ИСП-МС. **Результаты.** Опытные серии при 750°C и 200 МПа показали интенсивную перекристаллизацию амфибола и клинопироксена и локальную переработку калиевого полевого шпата щелочных сиенитов на границах “кристалл–расплав”. Расплав, полученный при плавлении стекла, при взаимодействии с сиенитом меняет свой состав, сохраняя щелочной (агпаитовый) характер, но с пониженным агпаитовым индексом, из которого кристаллизуется дискретный набор HFSE–PЗЭ фаз: циркон, Zr-титанит и соросиликаты группы чевкинита–перрьерита. Фиксируется резкое обогащение краевых зон амфибола и клинопироксена Mn, Sr, LREE, Y и Nb, относительно слабое изменение состава полевого шпата, что подчеркивает их роль как основного временного “буфера” редких элементов на ранней стадии реакции. **Выводы.** Результаты поддерживают модель локального перераспределения Zr–Ti–Nb–PЗЭ в межкристаллическом расплаве на границе “кристалл–расплав”, что позволяет формировать рудную минерализацию до участия более поздних гидротермальных процессов и могут быть напрямую применены к интерпретации рудоносных сиенитов массива Бурпала.

Ключевые слова: щелочные комплексы, соросиликаты, циркон, автометасоматоз, амфибол, клинопироксен

Источник финансирования

Экспериментальные исследования проведены за счет средств гранта РНФ № 22-17-00078-П, минералогические исследования были проведены в рамках государственного задания ИГМ СО РАН FWZN-2026-0002

Role of melt–mush interactions in the ore mineralization of Burpala alkaline syenite massif: Experimental results

Dmitry A. Chebotarev^{1,2}, Anna G. Doroshkevich^{1,2}, Anastasiya E. Starikova^{1,2}, Ivan A. Izbrodin^{1,2}

¹Novosibirsk State University, 2 Pirogov st., Novosibirsk 630090, Russia

²V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia, e-mail: chebotarev@igm.nsc.ru

Received 13.01.2026, accepted 13.04.2026

Research subject. Alkaline and nepheline ore-bearing syenites of the Burpala massif (Western Baikal). **Aim.** To experimentally model crystallizing melt–mush interactions during the early magmatic stages of syenite body formation in the Burpala massif to identify ore concentration mechanisms. **Materials and methods.** Experimental modeling of interactions between a crystallizing mush (alkaline syenite of the Burpala massif) and an interstitial, volatile-rich, alkali-satu-

Для цитирования: Чеботарев Д.А., Дорошкевич А.Г., Старикова А.Е., Избродин И.А. (2026) Роль взаимодействия “кристалл–расплав” в формировании рудной минерализации щелочных сиенитов массива Бурпала (З. Прибайкалье): результаты экспериментов. *Литосфера*, 26(3), 682–695. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-3-682-695>. EDN: CXPOPD

For citation: Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Starikova A.E., Izbrodin I.A. (2026) Role of melt–mush interactions in the ore mineralization of Burpala alkaline syenite massif: Experimental results. *Lithosphere (Russia)*, 26(3), 682–695. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-3-682-695>. EDN: CXPOPD

© Д.А. Чеботарев, А.Г. Дорошкевич, А.Е. Старикова, И.А. Избродин, 2026

rated melt (in the form of glass obtained by preliminary melting of ore-bearing nepheline syenite from the Burpala massif) was carried out in hydrothermal autoclaves equipped with a rapid-quench system at 750°C and 200 MPa. The starting materials and experimental products were analyzed using SEM and LA–ICP–MS methods. *Results.* Experimental runs at 750°C and 200 MPa revealed intensive recrystallization of clinopyroxenes and localized reworking of K-feldspar at crystal–melt interfaces in alkaline syenites. The melt produced as a result of glass melting interacts with the syenite and changes its composition, retaining an alkaline (agpaitic) character although with a lower agpaitic index. From this melt, a discrete assemblage of HFSE–REE phases crystallizes, including zircon, Zr-titanite, and sorosilicates of the chevkinite–perrierite group. A sharp enrichment of clinopyroxene rim zones in Mn, Sr, LREE, Y, and Nb is observed, while the feldspar composition shows relatively minor changes, highlighting the role of clinopyroxene as the main temporary “buffer” for rare elements at the early reaction stage. *Conclusions.* The results support the model of local redistribution of Zr–Ti–Nb–REE in the intercrystalline melt at the crystal–melt interface, which allows the formation of ore mineralization before the participation of later hydrothermal processes and can be directly applied to the interpretation of ore-bearing syenites of the Burpala massif.

Keywords: alkaline complexes, sorosilicates, zircon, autometasomatism

Funding information

Experimental studies were supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-17-00078-P; mineralogical studies were carried out within the framework of the state assignment of the IGM SB RAS FWZN-2026-0002

ВВЕДЕНИЕ

Щелочные магматические комплексы являются одним из важнейших источников стратегически значимых редких металлов и редкоземельных элементов, экономическая и геополитическая ценность которых непрерывно возрастает. Значимые концентрации Zr, Nb, PЗЭ и других высокозарядных элементов (HFSE) характерны для агпайтовых нефелиновых сиенитов, щелочных гранитов, связанных с ними пегматитов и карбонатитов, где они сосредоточены в акцессорных минералах, слагающих рудные зоны. При этом, несмотря на десятилетия исследований, полное понимание ключевых факторов, контролирующих формирование такой минерализации, до сих пор отсутствует: остаются открытыми вопросы о соотношении магматических и постмагматических процессов, о роли флюидной фазы, о механизмах переноса и локализации HFSE и PЗЭ в пределах массивов.

На основе опыта, накопленного нами и другими исследовательскими группами, сформировалась концепция, согласно которой одним из возможных механизмов концентрации высокозарядных и редкоземельных элементов в щелочных комплексах является сочетание процесса длительной фракционной кристаллизации щелочного расплава и последующего взаимодействия формирующейся кристаллической массы с межкристаллическим расплавом. (В англоязычной литературе использу-

ется многозначный термин “*crystal mush*”, который в буквальном переводе означает “кристаллическая каша”, но также его можно рассматривать как “пористый кристаллический осадок”, “ранний кристаллический каркас” или “кристаллическая масса” в пределах некоторой области магматической камеры, насыщенный поровым, межзерновым расплавом – здесь и далее прим. авторов) (O’Neil, Jenner, 2012; Coogan, O’Hara, 2015; Cooper et al., 2016; Jackson, Sparks, 2016; Lissenberg, MacLeod, 2016; Zhu et al., 2023). Состав щелочных магм дополнительно осложняет эту задачу: они, как правило, богаты летучими компонентами (H₂O, F, Cl, S и др.) и эволюционируют многостадийно, с интенсивным воздействием разнообразных агрессивных позднемагматических и гидротермальных флюидов. Это приводит к частичному уничтожению первичных текстур и химических градиентов, что сильно затрудняет прямую реконструкцию магматических процессов по природным образцам. Тем не менее, данные по расплавному и флюидным включениям в минералах, а также поведение HFSE и PЗЭ указывают на существование специфических остаточных расплавов в межкристаллическом пространстве ранней кристаллизующейся массы, обогащенных редкоземельными и высокозарядными элементами и летучими компонентами до экстремально высоких степеней концентрации, к которым зачастую применяется термин “*рассол–расплав*” (Prokoryev et al.,

2016, 2023). Такие расплавы и, в особенности, рассол-расплавы, просачивающиеся через кристаллизующуюся массу, по-видимому, играют двойную роль – одновременно выступают транспортной средой и активным агентом перераспределения рудного вещества как в пределах узкоограниченного объема (локализованного, возможно изолированного) “расплавного кармашка” (*melt pocket*) для отдельных областей, так и в пределах всего объема кристаллизующейся массы. Именно их физико-химические свойства, вероятно, контролируют положение рудных зон и возможность достижения промышленных рудных концентраций. Особый интерес представляют случаи внедрения в такую кристаллическую массу новых порций магмы (расплава) в процессе формирования магматических тел щелочных массивов.

Традиционные модели формирования для щелочных сиенитовых комплексов в целом сводятся к схеме “классическая” фракционная кристаллизация с последующими позднемагматическим/гидротермальным перераспределением HFSE и PЗЭ. Эта схема хорошо объясняет общую тенденцию накопления несовместимых элементов в остаточном расплаве и появление Zr–Nb–PЗЭ-минералов на поздних стадиях кристаллизации, но не объясняет ураганных содержаний рудных элементов и слабо описывает детали: почему рудные тела часто приурочены к границам между разновозрастными фазами, к реакционным зонам по контактам с вмещающими породами, к локальным участкам в тех местах внутри массива, где происходило просачивание или иной тип внедрения расплава. В частности, для рудоносных сиенитов массива Бурпала наблюдается четкая пространственная связь HFSE–PЗЭ-минерализации с зонами сложного реакционного контакта между разными генерациями сиенитов, что трудно объяснить одной лишь фракционной кристаллизацией.

Современная концепция взаимодействия “кристаллизующаяся масса–расплав” принципиально меняет взгляд на эти процессы. В рамках этой модели магматический резервуар рассматривается не как однородная камера расплава, а как преимущественно кристаллизующаяся масса с межзерновым расплавом, через который периодически проходят новые порции магмы и флюидонасыщенных рассол-расплавов. Взаимодействие новой порции расплава и/или рассол-расплава с уже закристаллизованными минералами включает растворение/плавление последних, реакционную перекристаллизацию, фильтрацию и возникновение каналов для движения расплава, что создает условия для его обогащения HFSE и PЗЭ и последующей кристаллизации рудных минералов. Применительно к щелочным сиенитам это особенно важно: здесь высокощелочные, обогащенные F, Cl и CO₂ остаточные расплавы и/или карбонатитовые компоненты (рас-

плавы или флюидно-расплавные фазы) неизбежно взаимодействуют с уже сформировавшейся сиенитовой кристаллизующейся массой, состоящей из полевых шпатов, клинопироксена и акцессорных HFSE-минералов. В таких условиях взаимодействие расплава с кристаллизующейся массой может быть естественным механизмом роста щелочности и снижения глиноземистости расплава, локального плавления и концентрирования Zr, Nb и PЗЭ в реакционных зонах, пегматоидных прослоях и рудных линзах.

Преимуществами модели взаимодействия “кристаллизующаяся масса–расплав” являются согласованность с современными представлениями о строении магматических резервуаров, способность объяснять пространственную привязку рудных зон к границам между интрузивными фазами и реакционным контактам, а также естественное объединение магматических и позднемагматических процессов в единую динамическую систему расплав–кристалл (или кристаллизованная масса)–флюид. В то же время для щелочных сиенитовых комплексов эта гипотеза недостаточно подкреплена количественными данными: мало экспериментальных данных о перераспределении HFSE и PЗЭ при взаимодействии кристаллического осадка с флюидо- и галоген-насыщенными расплавами, о роли рассол-расплавов как отдельной фазы и о деталях формирования реакционных зон в условиях, близких к природным.

Массив Бурпала рассматривается как природный пример щелочно-сиенитовой системы, в которой взаимодействие расплава с ранее выделившимися (кристаллизовавшимися) минералами могло существенно влиять на перераспределение Zr, Nb и PЗЭ и на локализацию рудных концентраций. В настоящей работе эта концепция проверяется экспериментально: проведены высокотемпературные опыты по взаимодействию нерудной сиенитовой кристаллической массы с межзерновым расплавом в ней и последующее исследование продуктов экспериментов методами электронно-зондового микроанализа, сканирующей электронной микроскопии и ЛА-ИСП-МС. Целью выступает выявление состава и текстур образующихся экспериментальных расплавов и кристаллов, проследить распределение HFSE и PЗЭ и оценить роль Na–Ti–Zr–REE-фаз как потенциальных концентраторов рудного вещества на контактах расплав–кристаллическая масса.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАССИВА БУРПАЛА

Массив Бурпала расположен в Северном Прибайкалье, в бассейне р. Майгунда (приток р. Мама), является частью позднепалеозойской Северо-Байкальской щелочной провинции, находящей-

ся в зоне сочленения Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), а именно на границе западного сегмента Байкало-Витимского пояса ЦАСП с краевой южной частью Сибирского кратона.

Массив представляет собой редкометалльную щелочную интрузию центрального типа площадью порядка 250 км², внедренную в слабометаморфизованные терригенные отложения кембрия (алевролиты, песчаники, реже известняки), сопровождаемые широким развитием контактных метасоматитов (фенитов). Возраст сиенитов главной фазы составляет 298–296 млн лет, а редкометалльных сиенитов и пегматитов – 291–283 млн лет (Kotov et al., 2013; Избродин и др., 2024; Старикова и др., 2024); массив входит в состав позднепалеозойской Северо-Байкальской щелочной провинции (Doroshkevich et al., 2012; Yarmolyuk et al., 2013; Tsygankov, 2014; Tsygankov et al., 2017; Rytsk et al., 2017).

В строении массива участвует широкий спектр щелочных пород: от шонкинитов, меланократовых и нефелиновых сиенитов до щелочных кварцосодержащих и кварцевых сиенитов, альбит-эгириновых и щелочных гранитов, и редкометалльных пегматитов; по химическому составу основные разновидности относятся к фойдо-монцосиенитам, фойдо-сиенитам и сиенитам, варьируя от агпаитовых до миаскитовых разностей. Интрузия имеет ярко выраженную концентрическую зональность: внешние части сложены кварцевыми и кварцосодержащими сиенитами, центральная зона – щелочными и нефелиновыми сиенитами; в центральной части развиты жильные тела щелочных гранитов, аплитов, редкометалльных щелочно-сиенитовых пегматитов, апатит-флюоритовых пород. Контактная зона характеризуется интенсивной фенитизацией вмещающих пород с формированием альбититов, микроклин-альбититов, альбит-эгириновых пород.

Массив Бурпала относится к уникальным редкометалльным щелочным минералогическим объектам: в редкометалльных сиенитах и связанных с ними пегматитах и метасоматитах описано более 70 минералов, богатых Zr, Nb, Ti, Th, Be и PЗЭ, включая до 80% всех известных Zr-силикатов (эвдиалит, ловенит, сейдозерит, бурпалит, катапleit, власовит и др.), а также широкий набор Ti-, Nb- и PЗЭ-минералов (лопарит, пироклор, фергузонит, чевкинит и др.). Концентрации редких элементов в рудоносных разностях достигают ≈3.6 мас. % ΣPЗЭ, до 4.0 мас. % Zr, ≈0.5 мас. % Nb, Y и Th и ≈0.1 мас. % U, что подчеркивает высокую металлогенную специализацию массива. Геохимические и изотопные данные (низкая Mg#, выраженная отрицательная Eu-аномалия, сходные Sr–Nd–Pb характеристики основных разностей) свидетельствуют о длительной фракционной кристаллизации щелочно-базальтового расплава, сгенерированно-

го из метасоматизированной литосферной мантии с участием процесса ассимиляции корового силикатического материала, что согласуется с представлением о многостадийной эволюции щелочного плутона и формировании Zr–Nb–PЗЭ-минерализации на поздних стадиях развития сиенитовой магматической системы (Старикова и др., 2024; Дорошкевич и др., 2025).

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАССИВА БУРПАЛА В КАЧЕСТВЕ МОДЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Массив Бурпала представляет собой характерный пример многостадийного щелочного плутона, в геологическом строении которого реализуются условия, благоприятные для проявления процессов взаимодействия расплава с кристаллическим осадком. Концентрическая зональность массива, смена меланократовых сиенитов более поздними нефелиновыми и щелочными сиенитами, затем кварцевыми сиенитами, щелочными гранитами, аплитами и пегматитами свидетельствуют о длительном существовании промежуточной магматической камеры и повторном импульсном внедрении порций магмы. В таких условиях основная часть объема камеры на значительной части ее эволюции представлена не однородным расплавом, а преобладающе кристаллическим осадком с ограниченным количеством порового, межзернового остаточного расплава, которые непрерывно меняют состав как в ходе реакционного взаимодействия с кристаллами, так при регулярном обновлении и реакционном взаимодействии с новыми порциями магмы и флюидонасыщенных рассол-расплавов.

Zr–Nb–PЗЭ-минерализация массива Бурпала пространственно и парагенетически приурочена преимущественно к зонам, где реализуются наибольшие контрасты между расплавом и кристаллическим осадком и, соответственно, наиболее вероятны процессы реакционного взаимодействия между ними. К числу таких зон относятся контакты между интрузивными фазами, области фенитизации вмещающих пород, а также участки концентрации альбит-эгириновых сиенитов, щелочно-сиенитовых пегматитов. В этих зонах фиксируются высокие содержания Zr, Nb, PЗЭ, Y, Th, U и чрезвычайно широкий спектр цирконосиликатов и минералов Nb, Ti, и PЗЭ. Важно, что HFSE- и PЗЭ-фазы установлены в нефелиновых и щелочных сиенитах, где они занимают интерстициальное положение в межзерновом пространстве. Такое положение фаз прямо указывает на их кристаллизацию из остаточного межкристаллического расплава, циркулировавшего в поровом пространстве кристаллизующейся массы, а не только из отдельно существовавшей поздней магматической камеры или чисто гидротермального раствора.

Геохимические и изотопные данные по массиву Бурпала указывают, что его основные разновидности пород произошли от щелочной магмы, изначально обогащенной HFSE и PЗЭ, и эволюционировали через длительную фракционную кристаллизацию. Эта эволюция сопровождалась метасоматическими преобразованиями, появлением альбит-эгириновых и редкометалльных разностей, а также внедрением поздних даек щелочных сиенитов и гранитов. Исходя из такого набора пород логично предположить существование в магматической системе остаточных расплавов и рассол-расплавов, богатых Zr, Nb, PЗЭ и летучими компонентами, которые могли многократно проникать в уже частично закристаллизованную сиенитовую массу.

Важно, что в массиве встречаются HFSE-обогащенные участки (альбит-эгириновые и цирконосиликатные руды, редкометалльные пегматиты), пространственно локализованные в пределах безрудных нефелиновых и щелочных сиенитов. Это лучше согласуется с моделью локального перераспределения рудного вещества при взаимодействии поздних HFSE и PЗЭ насыщенных расплавов с более ранней или кристаллизующейся массой, чем с моделью простой фракционной кристаллизации единой магмы. Поэтому массив Бурпала можно рассматривать как природный пример системы, где взаимодействие кристаллизующейся массы с межзерновым расплавом могло быть ключевым механизмом формирования Ti-Zr-Nb-PЗЭ-минерализации в ней – и именно этим мотивирован выбор массива как объекта экспериментального моделирования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты по моделированию процессов взаимодействия “кристаллизующаяся масса–расплав” на магматических стадиях кристаллизации щелочных сиенитов массива Бурпала проводились в герметичных платиновых ампулах при 750°C и 200 МПа в гидротермальных автоклавах с системой быстрой закалки в ИГМ СО РАН. С детальным описанием автоклавов такого типа можно ознакомиться, например, в работах (Matthews et al., 2003; Fang et al., 2024). Ключевыми особенностями и преимуществами этих автоклавов является возможность проведения длительных (недельных и месячных) экспериментов при высоких температурах (до 900°C) и давлениях (до 300 МПа) с последующей быстрой (менее 1 секунды) изобарической “закалкой” продуктов экспериментов, что позволяет избежать реакции переуравновешивания продуктов экспериментов между собой вследствие резкого изменения условий.

В качестве кристаллизованной массы был использован щелочной сиенит массива Бурпала БРЗ 5-3, для моделирования межзернового расплава применялся расплавленный нефелиновый рудный си-

енит БРЗ 5-6д. С детальным описанием минералогии и химического состава по главным и редкоземельным компонентам выбранных модельных пород можно ознакомиться в работе (Дорошкевич и др., 2025). Ключевые различия между ними заключаются в содержании рудных компонентов, таких как Zr, Nb, Ti, PЗЭ и др.: в БРЗ 5-6д их содержание в разы, а по некоторым и в десятки раз выше, чем в БРЗ 5-3. Таким образом, выбор щелочного сиенита БРЗ 5-3 воспроизводит ранний магматический кумулус минералов, в которые не вошли Zr, Nb и значительная часть PЗЭ, а нефелиновый сиенит БРЗ 5-6д моделирует расплав в межкристаллическом пространстве такого кумулуса.

Для получения модельного расплава сиенит БРЗ 5-6д измельчили до состояния пудры и поместили в герметичную платиновую ампулу с добавлением 10 мас. % дистиллированной воды, после чего выдержали в автоклаве с быстрой закалкой при 880°C и 200 МПа в течение 7 дней для получения гомогенного стекла.

Для экспериментов по моделированию взаимодействия “кристаллизующаяся масса–расплав” в платиновые ампулы поместили смесь фрагментов (дробленый материал фракций размером до 5 мм) сиенита БРЗ 5-3 (до 5 мм) (рис. 1а), хаотично смешанных с полученным стеклом БРЗ 5-6д (раскрошенные, но не перетертые в пудру фрагменты размером до 1 мм) (рис. 1в) в пропорции 9 к 1 по массе для моделирования условий “crystal mush”, при которых соотношение доли кристаллов много больше доли расплава. Эксперименты проводились при 750°C и 200 МПа в течение 5 дней. Выбор этих параметров обусловлен оценками образования щелочных и фельдшпатоидных сиенитов массива Бурпала (Старикова и др., 2024).

Эпоксидные шашки с исходными породами и извлеченными из платиновых ампул продуктами экспериментов полировались на алмазных пастах без использования воды и изучались в ЦКП ИГМ СО РАН. Для изучения структурно-текстурных особенностей образцов и макроэлементного состава применялся сканирующий электронный микроскоп TESCAN MIRA 3 LMU с INCA EDS 450, оборудованный системами микроанализа Inca Energy 450+/Aztec Energy XMax80 и Inca Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis). Условия съемки: энергия электронного пучка 20 кэВ, ток электронного зонда 1.5 нА, время набора спектра 30 с. Состав расплавов определялся в растровом режиме по площадкам размером несколько десятков мкм² для минимизации потерь щелочей под электронным пучком. Для количественной оптимизации применялся металлический кобальт.

Микрокомпонентный состав был определен методом LA-SFICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific Ltd, США) с эксимерной системой лазерной

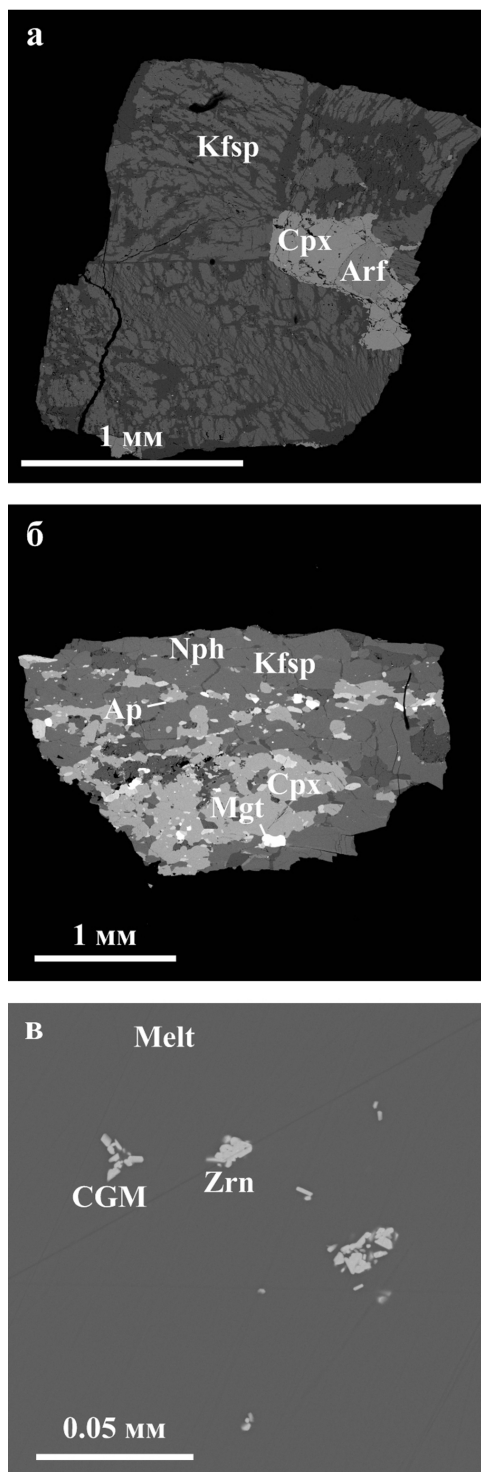


Рис. 1. Щелочной сиенит БРЗ 5-3 и нефелиновый сиенит БРЗ 5-6д до экспериментов (а, б); закаленный расплав (стекло), полученный в результате эксперимента по плавлению нефелинового сиенита БРЗ 5-6д при 880°C (в).

Nph – нефелин, *Cpx* – клинопироксен, *Arf* – арфведсонит, *Kfsp* – калиевый полевой шпат, *Ap* – апатит, *Mgt* – магнетит, *Zrn* – циркон, *CGM* – соросиликаты группы чевкинита.

Fig. 1. Alkaline syenite BRZ 5-3 and nepheline syenite BRZ 5-6d before experiments (a, б); quenched melt (glass) obtained as a result of the experiment on melting nepheline syenite BRZ 5-6d (в).

Nph – nepheline, *Cpx* – clinopyroxene, *Arf* – Arfvedsonite, *Kfsp* – potassium feldspar, *Ap* – apatite, *Mgt* – magnetite, *Zrn* – zircon, *CGM* – sorosilicates of the chevkinite group.

аблиции Analyte Excite (Teledyne Cetac, США), оснащенной двухкамерной ячейкой HelEx II. Диаметр лазерного луча составлял 20–35 мкм, частота повторения импульсов 5 Гц и плотность энергии лазерного излучения 3 Дж/см².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализы исходных сиенитов показали, что использованный в экспериментах образец щелочно-го сиенита БРЗ 5-3 преимущественно сложен калиевым полевым шпатом с пертитом альбита, который также занимает интерстициональное положение, щелочным амфиболом арфведсонитового ряда и клинопироксеном щелочного ряда эгирин-авгитовой серии (Fe-Na-эгирин-авгит) (см. рис. 1а; 3; 4; табл. 1). В образце присутствуют единичные зерна апатита, флюорита, циркона. Образец нефелинового сиенита БРЗ 5-6д сложен калиевым полевым шпатом, клинопироксеном, нефелином, акцессорными перовскитом, магнетитом, содержащим РЗЭ фторапатитом (рис. 1б).

Анализы стекла, полученного в результате закаливания расплава нефелинового сиенита БРЗ 5-6д при 880°C и 200 МПа, показали, что оно получилось однородным с редкими, единичными закалочными включениями циркона и соросиликатами группы чевкинита (см. рис. 1в) и имеет щелочно-алюмосиликатный состав с умеренным содержанием FeO (6.1 мас. %), заметным – TiO₂ (1.7 мас. %) и ZrO₂ (1.2 мас. %) (см. табл. 1).

В результате взаимодействия фрагментов щелочного сиенита БРЗ 5-3 с закаленным расплавом БРЗ 5-6д при 750°C (рис. 2а, б), вдоль границ и трещин полевых шпатов в экспериментальных образцах наблюдаются поры (см. рис. 1а, 2в), а также реакционные каймы в кристаллах полевых шпатов и клинопироксенов (см. рис. 2б, г). Данные новообразования отсутствуют в кристаллах этих минералов в исходном материале (см. рис. 1а). Контакт расплава с полевыми шпатами однородный и постепенный, на контактах кристаллов клинопироксенов с расплавом фиксируются следы растворения и образование новых минеральных фаз (см. рис. 2г). В областях между фрагментами щелочного сиенита 5-3, где находилось исходное стекло БРЗ-5-6д, сформировался расплав, насыщенный включениями новообразованных рудных фаз – циркона, титанита, содержащего Zr и РЗЭ, и Zr-Ti-РЗЭ силикатов (предположи-

Таблица 1. Составы исходных веществ и продуктов экспериментов
Table 1. Compositions of starting materials and experimental products

Показатель	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Ce ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	ZrO ₂	HfO ₂	Сумма
Циркон при 880°C	31.33	–	–	0.44	–	–	–	–	–	–	–	–	66.05	–	97.81
Стандартное отклонение	0.01	–	–	0.02	–	–	–	–	–	–	–	–	0.90	–	0.91
Соросиликаты группы чевкинита при 880°C (7)	22.12	21.56	1.06	7.68	–	0.43	6.75	0.68	0.29	15.18	12.82	1.62	3.45	–	96.81
Стандартное отклонение	1.74	2.34	1.05	0.59	–	0.03	0.78	0.38	0.17	0.74	1.03	0.30	0.70	–	1.74
Стекло исходное (8)	57.77	1.69	10.78	6.13	0.33	0.32	1.29	7.94	4.61	0.07	–	–	1.19	–	92.00
Стандартное отклонение	0.55	0.16	0.21	0.86	0.04	0.04	0.04	0.30	0.07	0.20	–	–	0.12	–	0.59
Расплав (10)	60.67	0.59	12.19	3.56	0.20	0.19	0.36	6.60	5.33	–	–	–	0.73	–	90.42
Стандартное отклонение	1.92	0.37	2.78	2.08	0.14	0.13	0.23	1.45	2.04	–	–	–	0.57	–	2.92
Арфведсонит (12)	49.70	1.18	1.82	23.51	0.95	6.43	1.29	8.57	1.31	–	–	–	–	–	94.76
Стандартное отклонение	0.64	0.43	0.77	2.22	0.31	2.02	0.41	1.36	0.42	–	–	–	–	–	1.26
Fe-Na-эгирин-авгит (5)	50.29	0.83	0.38	27.41	0.41	1.19	4.47	10.44	–	–	–	–	0.22	–	95.64
Стандартное отклонение	0.28	0.15	0.09	0.39	0.06	0.22	0.80	0.59	–	–	–	–	0.25	–	0.83
Новообразованный клинопироксен (8)	50.23	1.12	0.86	22.19	0.77	3.75	11.73	6.52	0.17	0.04	–	–	0.49	–	97.86
Стандартное отклонение	1.05	0.51	0.57	1.30	0.06	0.63	1.34	0.85	0.20	0.12	–	–	0.22	–	0.97
Полевой шпат (5)	61.41	–	16.73	0.92	–	–	–	5.55	6.97	–	–	–	–	–	91.57
Стандартное отклонение	3.71	–	1.39	0.34	–	–	–	4.75	7.44	–	–	–	–	–	6.86
Титанит (5)	32.43	31.04	1.26	1.96	0.13	–	22.61	1.52	0.54	1.16	0.56	0.23	4.33	–	97.76
Стандартное отклонение	1.96	1.25	0.71	0.20	0.14	–	0.98	0.27	0.24	0.25	0.37	0.26	0.27	–	1.67
Циркон (1)	30.98	0.25	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	64.93	1.03	97.19
Соросиликаты группы чевкинита (8)	26.03	18.27	2.18	7.48	–	–	5.66	1.42	0.75	13.09	11.23	1.73	3.49	–	91.32
Стандартное отклонение	6.26	3.14	1.73	1.02	–	–	1.17	1.33	0.70	3.05	2.60	0.68	0.92	–	3.38

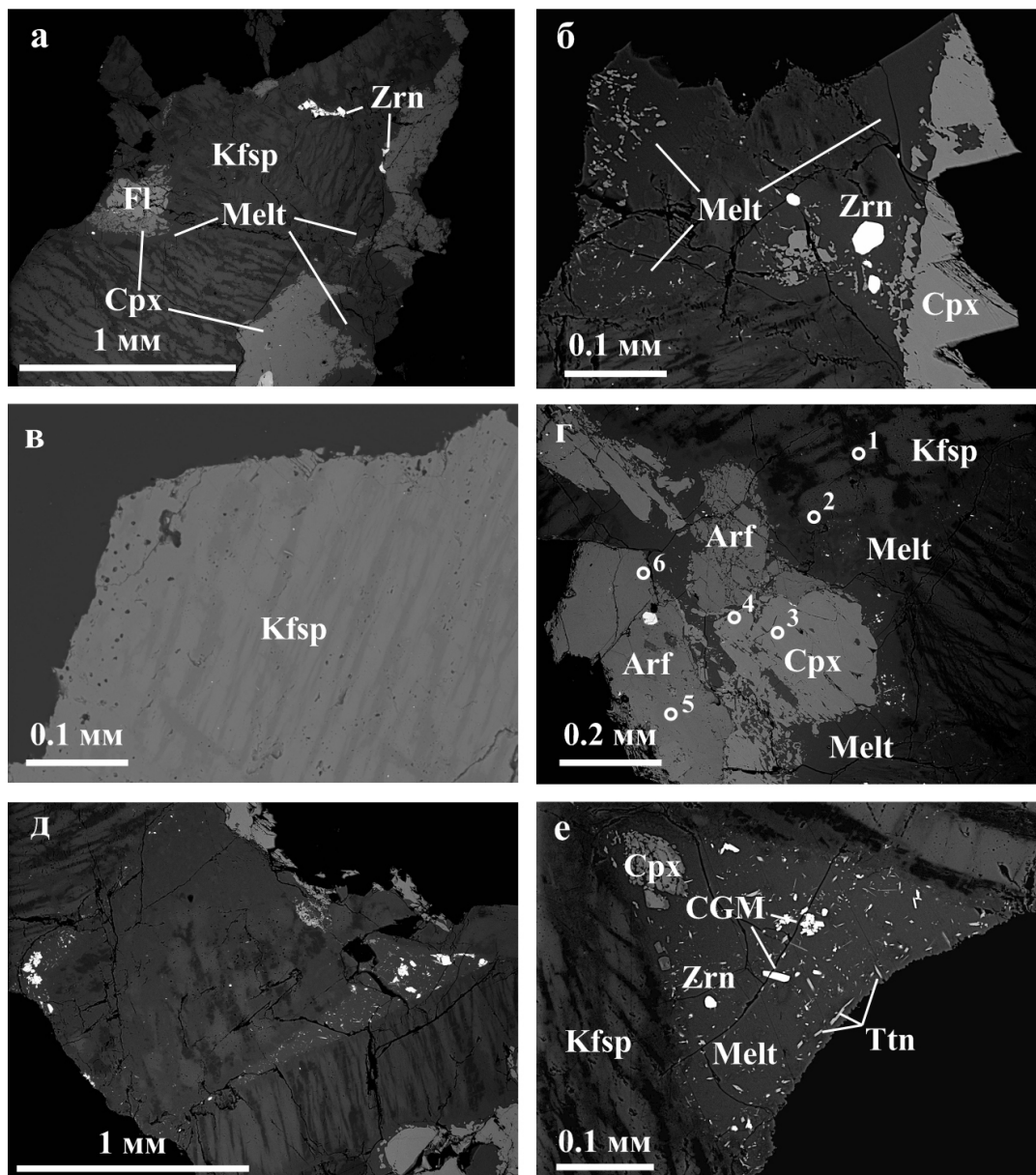


Рис. 2. Общий вид образца с щелочным сиенитом БРЗ 5-3 после эксперимента по взаимодействию со стеклом БРЗ 5-6д при 750°C и 200 МПа (а, б); реакционные пустоты, образовавшиеся в ходе эксперимента вдоль границ и ослабленных зон в кристалле полевого шпата (в); контактовая зона новообразованного расплава с полевым шпатом и клинопироксенами (точками показаны места анализов ЛА-ИСП-МС, масштаб точек приблизительно соответствует размеру ручки анализа) (г); места заложения стекла БРЗ 5-6д, образовавшие в ходе эксперимента расплав, вступивший в реакцию с полевыми шпатами и образовавший циркон, Zr-титанит и минералы группы чевкинита (д, е).

Zrn – циркон, *Cpx* – клинопироксен, *Arf* – арфведсонит, *Kfsp* – калиевый полевой шпат, *Ttn* – Zr-титанит, *CGM* – соросиликаты группы чевкинита.

Fig. 2. General view of the sample with alkali syenite BRZ 5-3 after the experiment on interaction with glass BRZ 5-6d at 750°C and 200 MPa (a, b); reaction voids formed during the experiment along the boundaries and weakened zones in the feldspar crystal (b); contact zone of the newly formed melt with feldspar and clinopyroxenes (the dots indicate the locations of LA-ICP-MS analyses) (c); locations of the BRZ 5-6d glass occurrence, which formed during the experiment the melt that reacted with feldspars and formed zircon, Zr-titanite and minerals of the chevkinite group (d, e).

Zrn – zircon, *Cpx* – clinopyroxene, *Arf* – Arfvedsonite, *Kfsp* – potassium feldspar, *Ttn* – Zr-titanite, *CGM* – sorosilicates of the chevkinite group.

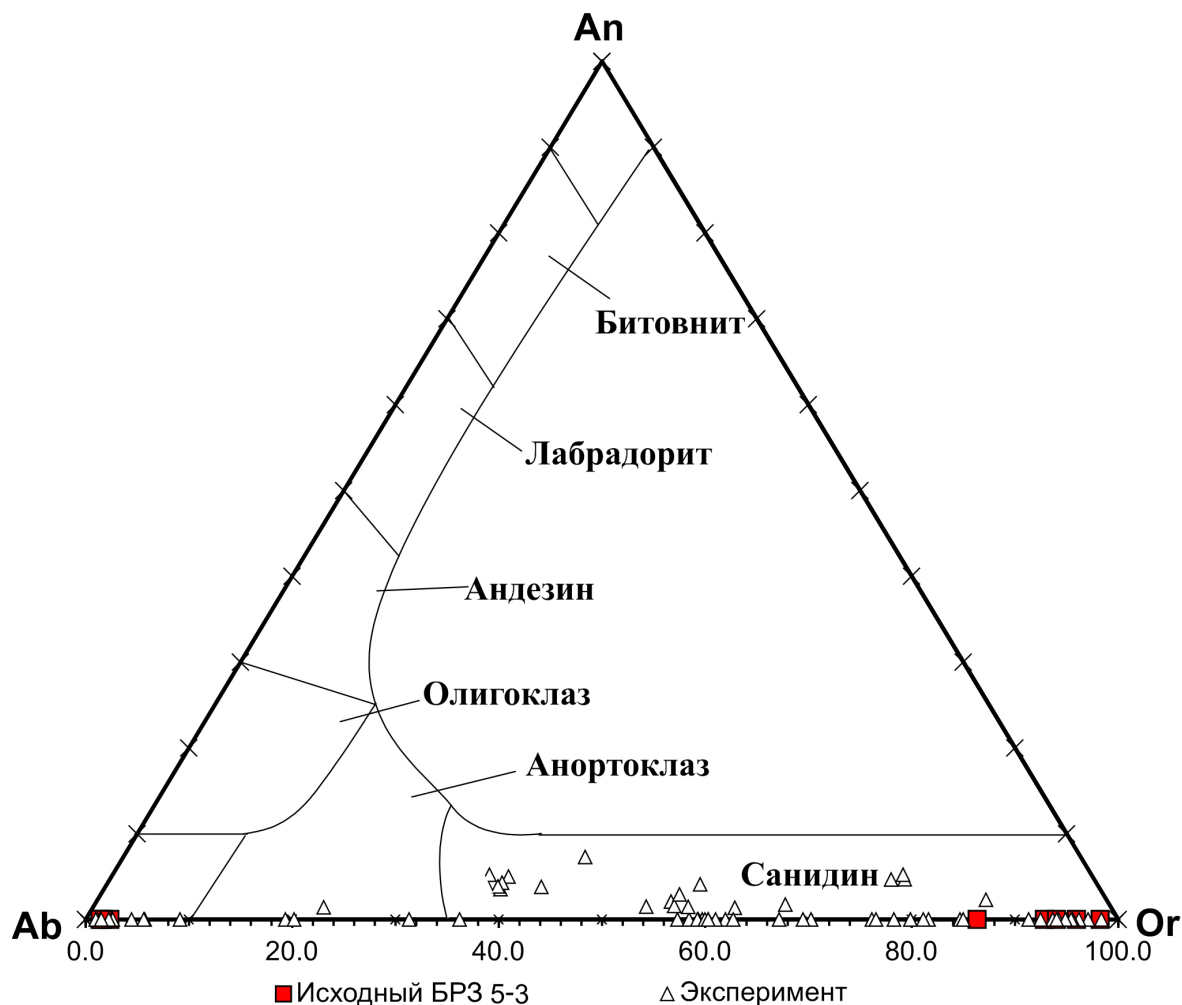


Рис. 3. Составы полевых шпатов до экспериментов и после них.

Fig. 3. Compositions of feldspars before and after experiments.

тельно соросиликаты группы чевкинита) (рис. 2д, е). При этом новообразованные рудные фазы также отмечаются во фрагментах щелочного сиенита БРЗ 5-3 – на контакте расплава с кристаллами полевого шпата и клинопироксена (см. рис. 2г, д).

На контакте расплава с исходными арфведсонитом и Fe-Na-эгирин-авгитом, образовались реакционные ободки новообразованного клинопироксена. Также здесь наблюдаются субмикронные включения, резко контрастирующие в BSE-изображениях (см. рис. 2г). Новообразованный клинопироксен отличается от обоих исходных минералов главным образом резким ростом CaO (до 11.7 мас. %) при одновременном снижении Na₂O (до 6.5 мас. %) и промежуточными MgO (3.8 мас. %), FeO (22.2 мас. %), Al₂O₃ и TiO₂ (около 1 мас. %) (см. рис. 4). Таким образом, это отдельная, более кальциевая и менее натриевая генерация клинопироксена, смещенная к авгит-геденбергитовым составам.

В результате экспериментов образовались щелочные полевые шпаты, состав которых варьирует от почти чистого калиевого полевого шпата до альбита (см. рис. 3). Полученный набор отражает интенсивный обмен щелочей и перекристаллизацию в контактовой зоне расплав–КПШ. Разброс Na₂O и K₂O в табл. 1 связан с зональностью/пертитам и различной степенью взаимодействия с расплавом.

Профили ядро-кайма в полевом шпате, Fe-Na-эгирин-авгите и арфведсоните демонстрируют контрастную зональность по HFSE и РЗЭ (табл. 2). Полевой шпат характеризуется низкими содержаниями HFSE и большинства РЗЭ (ниже пределов обнаружения), при относительно стабильных Ba (≈205–213 г/т) и умеренном Sr (100→87 г/т), тогда как суммарное содержание РЗЭ практически полностью контролируется La (≈255–256 г/т). Fe-Na-эгирин-авгит и арфведсонит, напротив, показывают систематическое обогащение краевых зон несо-

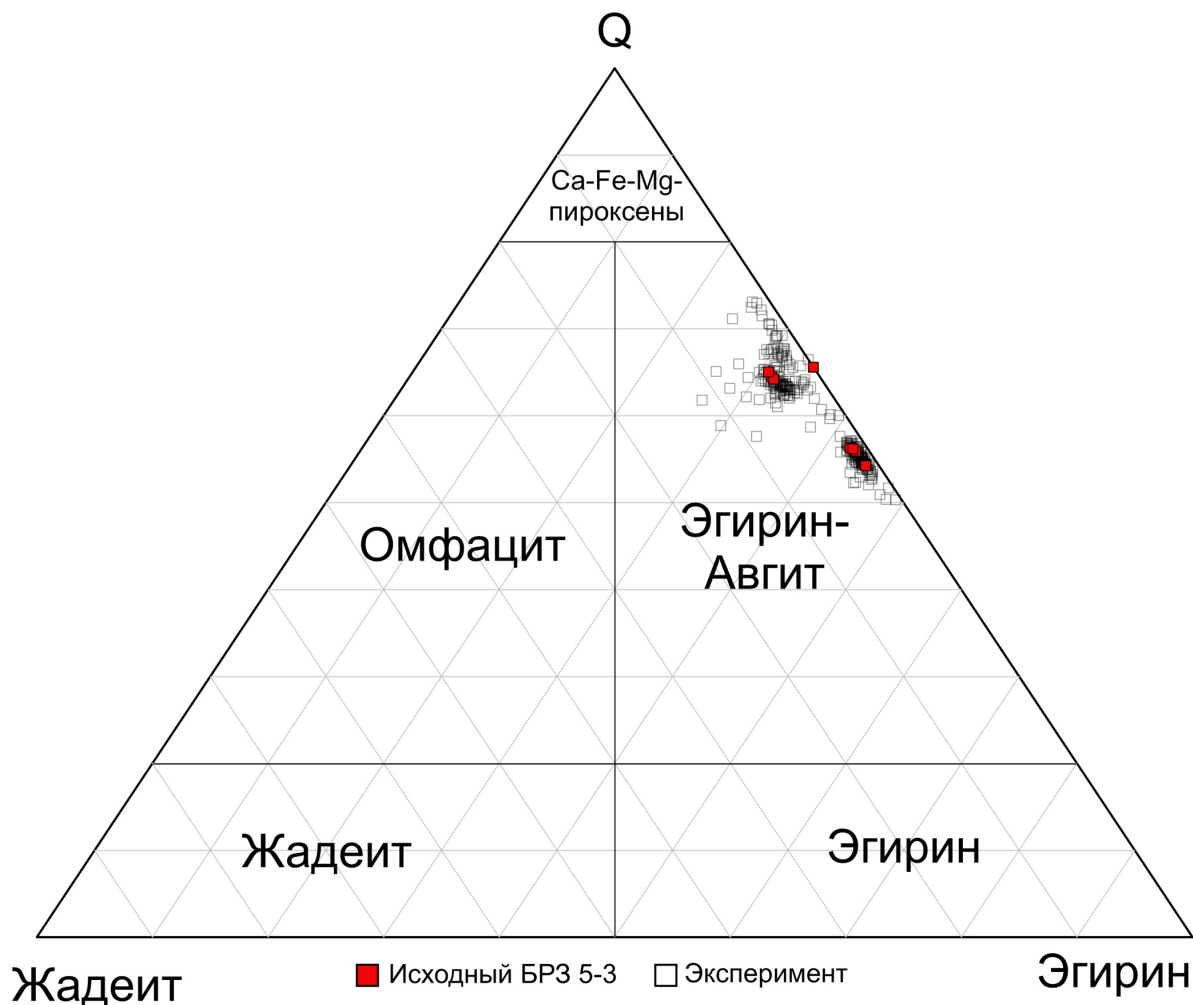


Рис. 4. Составы клинопироксенов до экспериментов и после них (Morimoto, 1988).

Fig. 4. Compositions of clinopyroxenes before and after experiments (Morimoto, 1988).

вместимыми компонентами: суммарное содержание РЗЭ возрастает с 47 до 644 г/т в Fe-Na-эгирин-авгите и с 149 до 457 в арфведсоните, сопровождаясь ростом Sr (274 → 628 г/т в Fe-Na-эгирин-авгите и 380 → 1055 в арфведсоните), появлением Rb (bdl → 214 г/т в Fe-Na-эгирин-авгите и 39 → 139 г/т в арфведсоните), Y (bdl → 56 г/т в Fe-Na-эгирин-авгите и 15 → 51 г/т в арфведсоните) и Nb (bdl → 89 г/т в Fe-Na-эгирин-авгите и bdl → 89 г/т в арфведсоните). При этом Zr и особенно Hf демонстрируют снижение от ядра к оторочке: Zr – 2188 → 1701 г/т в Fe-Na-эгирин-авгите и 2570 → 2163 г/т в арфведсоните; Hf – 108 → 36 г/т в Fe-Na-эгирин-авгите и 109 → 74 г/т в арфведсоните.

Области, интерпретируемые нами как участки закаленного межзернового расплава, характеризуются высокими SiO_2 (60.6–62.6 мас. %), значительными суммами щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ порядка 12–16 мас. %), пониженной/умеренной Al_2O_3

(≈10–11 мас. %) и низкими FeO (≈2.8 мас. %) при небольших долях TiO_2 (≈0.7–0.9 мас. %) и присутствии ZrO_2 (≈1.1–1.6 мас. %) (см. табл. 1). Суммы анализов для расплава пониженные (≈89–93 мас. %), что согласуется с наличием летучих компонентов и/или аналитическими эффектами для стеклообразного закаленного расплава. По сравнению с исходным стеклом расплав статистически смещен в сторону более кремнеземистого и более алюминиевого состава при одновременном снижении TiO_2 , FeO, CaO и ZrO_2 . Вариации по Al_2O_3 , FeO и щелочам заметно выше, чем в исходном стекле, что указывает на химическую неоднородность расплава (локальные микровкрапления/градиенты в зоне реакции).

В областях закаленного расплава между фрагментами щелочного сиенита 5-3, соответствующих исходному положению стекла БРЗ 5-6, фиксируются многочисленные включения выпавших из рас-

плава рудных минералов: циркона (с $\text{HfO}_2 \approx 1$ мас. %), титанита, содержащего Zr и PЗЭ (ZrO_2 3.9–4.5 мас. %, PЗЭ сумм. >2 мас. %), Zr-Ti-PЗЭ соросиликаты группы чевкинита ($\text{SiO}_2 \approx 19.9$ –25.9, $\text{TiO}_2 \approx 17$ –22, $\text{FeO} \approx 6$ –8, $\text{CaO} \approx 5$ –8, высокие суммы легких PЗЭ ($\text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{La}_2\text{O}_3 + \text{Nd}_2\text{O}_3$; суммарно десятки мас. %), при $\text{ZrO}_2 \approx 3$ –5 мас. %) (см. рис. 2г–е).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученная в ходе экспериментов ассоциация новообразованных рудных фаз и ее пространственная привязка (участок исходного стекла → расплав → контакт с калиевым полевым шпатом, арфведсонитом и Fe-Na-эгирин-авгитом → обилие рудных фаз) согласуются со сценарием локального формирования остаточного щелочного расплава, из которого затем быстро кристаллизуются Zr-Ti-PЗЭ минеральные фазы.

Состав новообразованного расплава можно охарактеризовать как высокощелочной, алюминий-недонасыщенный, со значимой долей летучих/растворенных компонентов (по дефициту суммы – в основном за счет добавленной воды, но также возможно наличие и других компонентов, не установленных нами в рамках предварительного анализа образцов в ходе данного исследования). Именно такая химическая среда наиболее эффективно удерживает HFSE и PЗЭ в расплаве до момента локального пересыщения. Контакт с полевыми шпатами приводит к обмену щелочей и росту/перекристаллизации альбит-ортотлазовых фаз: присутствие одновременно КПШ-богатых, смешанных и альбитовых составов логично выражается в диффузионно-реакционной переработке в пограничном слое “расплав–полевой шпат”.

В расплаве относительно исходного стекла наблюдается рост SiO_2 и Al_2O_3 при снижении TiO_2 , FeO , CaO и ZrO_2 (см. табл. 1). Это свидетельствует о том, что расплав образован не просто переплавлением исходного стекла, а смешением/переработкой с участием полевого шпата, арфведсонита и Fe-Na-эгирин-авгита: увеличение Al_2O_3 логично связывать с вкладом полевошпатовой компоненты, снижение Fe, Ti и Ca – кристаллизацией титанита и клинопироксена, Zr распределяется между титанитом и цирконом, а PЗЭ вместе с Ti-Fe-Ca стабилизируются в чевкинит-перрьеритовой группе. Такой баланс – сильный аргумент в пользу того, что расплав в межзерновом пространстве кристаллизующейся массы может рассматриваться и как источник рудных компонентов, и как среда их осаждения с формированием рудных минералов, которые формируются в зоне реакции расплава вместе с кристаллами кристаллизующейся массы непосредственно в ходе кристаллизации щелочного расплава, а не являются продуктом поздних гидротермальных процессов.

Таблица 2. Содержание редких элементов в продуктах экспериментов

Table 2. Content of rare elements in experimental products

Элемент	Полевой шпат		Fe-Na-эгирин-авгит		Арфведсонит	
	Центр	Край	Центр	Край	Центр	Край
	1	2	3	4	5	6
^{55}Mn	bdl	bdl	2732	7604	3135	13579
^{85}Rb	19	19	bdl	214	39	139
^{88}Sr	101	87	274	628	380	1055
^{89}Y	bdl	bdl	bdl	56	15	51
^{90}Zr	bdl	bdl	2188	1701	2570	2163
^{93}Nb	bdl	bdl	bdl	89	bdl	105
^{137}Ba	213	205	bdl	162	33	127
^{138}La	255	256	bdl	208	30	117
^{140}Ce	bdl	bdl	30	332	87	239
^{141}Pr	bdl	bdl	bdl	28	bdl	28
^{146}Nd	bdl	bdl	17	76	32	72
^{178}Hf	bdl	bdl	108	36	109	74
ΣREE	255	256	47	644	149	457

Каймы новообразованного Ca-богатого клинопироксена ($\text{CaO} \approx 11.7$ при падении Na_2O до ≈ 6.5) фиксируют собственно механизм переработки кристаллического кумулула в ходе взаимодействия “кристаллизующаяся масса–расплав”: Ca переходит из расплава (где он падает до ≈ 0.4 мас. %) в кристаллические фазы (новообразованные клинопироксен + титанит + соросиликаты).

Обогащение краевых зон арфведсонита и Fe-Na-эгирин-авгита Sr, Nb, PЗЭ при одновременном снижении Zr и Hf от ядра к периферии является типичным индикатором взаимодействия кристаллов с межкристаллическим расплавом. На раннем этапе ядра минералов фиксируют кристаллизацию из относительно Zr-Hf-обогащенной среды образования (что мы наблюдаем в исходных минералах: Zr 2200–2600 г/т; Hf ≈ 109 г/т), тогда как последующий рост/перекристаллизация оторочек происходят уже в среде, где высвободившиеся Zr-Hf формируют самостоятельные HFSE-минералы (циркон, Zr-титанит) и одновременно возрастает активность Nb, Sr, PЗЭ. Это согласуется с результатами эксперимента: расплав в ходе эксперимента обедняется Fe-Ti-Ca-Zr по сравнению с исходным, а HFSE/PЗЭ переходят в титанит + циркон + соросиликаты чевкинитовой группы. Различная интенсивность обогащения краевых частей по сумме PЗЭ в наших экспериментах указывает на неоднородность процессов переработки в контактной зоне (локальная проницаемость, толщина реакционной каймы, наличие микровкраплений ак-

цессорных фаз), что хорошо соответствует наблюдаемым BSE-контрастам, а данные лазерной абляции подчеркивают роль клинопироксена и арфведсонита как “временного накопителя” и буфера редких элементов.

Хотя основным результатом взаимодействия арфведсонита и Fe-Na-эгирина-авгита с расплавом является их перекристаллизация и перераспределение щелочей и щелочноземельных элементов, в ряде случаев в зонах контакта и внутри перекристаллизующихся кристаллов фиксируются субмикронные включения, резко контрастирующие в BSE-изображениях (см. рис. 2г). Их высокая средняя атомная масса указывает на обогащение высокозарядными и редкоземельными элементами и свидетельствует о нуклеации собственных рудных фаз в ходе реакционного взаимодействия. Эти наблюдаемые процессы свидетельствуют о том, что в контактовой зоне одновременно протекают: обмен щелочей ($\text{Na} \leftrightarrow \text{K}$) при взаимодействии расплава с полевым шпатом, перераспределение Fe-Mg-Ca в силикатных фазах и параллельное осаждение Ti, Zr и PЗЭ в самостоятельные рудные минералы. Следовательно, расплав является реакционной зоной, в которой работает механизм массопереноса, извлекающий из кристаллических фаз щелочные и щелочноземельные элементы и одновременно создающий условия для совместного насыщения расплава Ti–Zr–PЗЭ с последующим осаждением рудных аксессуаров.

Наличие циркона фиксирует достижение (локально) насыщения по Zr–Si. При этом Zr в расплаве присутствует не только в цирконе: значимые доли ZrO_2 обнаружены в титаните и соросиликатах. Это указывает на конкуренцию нескольких концентраторов Zr, где выбор фазы определяется локальным соотношением Ti–Ca–Fe–PЗЭ и активностью SiO_2 .

Получившиеся соросиликаты – типичный продукт кристаллизации из щелочных расплавов, обогащенных LREE и Ti. Высокие суммы Ce–La–Nd при значительном TiO_2 и FeO указывают на ситуацию, когда происходят пересыщение расплава по REE–Ti-комплексам и их кристаллизация в виде самостоятельной фазы. Присутствие ZrO_2 на уровне нескольких процентов в этих фазах дополнительно подчеркивает HFSE-характер расплава и возможность изоморфного вхождения Zr в структуру соросиликатов.

Содержащий Zr и PЗЭ титанит в анализируемых образцах не был типичной первичной фазой закаленного стекла, а его распространение и химизм указывают на образование в результате перераспределения CaO и TiO_2 при реакции межзернового расплава BPЗ 5-6 с полевыми шпатами/пироксенами щелочного сиенита 5-3. Это позволяет рассматривать титанит как маркер локальной переработки расплава и кристаллической массы в ходе их взаимодействия. Повышенные ZrO_2 (до $\approx 4.0\text{--}4.5\%$)

и PЗЭ (>2 мас. %) показывают, что титанит может быть дополнительным концентратором HFSE и PЗЭ при отсутствии/недостатке самостоятельных Zr-Nb-PЗЭ фаз.

Наши наблюдения позволяют выделить источники образования рудных фаз. Соросиликаты группы чевкинита и циркон фиксируются уже в исходном (переплавленном и закаленном) материале рудного нефелинового сиенита 5-6, что свидетельствует о склонности этого получившегося расплава к раннему осаждению HFSE и PЗЭ. В связи с этим можно предположить, что соросиликаты и циркон в экспериментах по взаимодействию могли образоваться в ходе осаждения из исходного расплава. В то же время, их образование могло быть усилено за счет взаимодействия расплава с исходными минералами щелочного сиенита 5-3. Другим признаком этого взаимодействия является титанит, который интерпретируется как продукт переработки расплава и минералов щелочного сиенита 5-3 при их контакте.

При этом рудные фазы локализованы как в участках заложения исходного стекла/расплава, так и в непосредственной реакционной зоне на контакте с полевыми шпатами, арфведсонитом и клинопироксенами. Именно в этих зонах происходят: 1) локальное накопление несовместимых компонентов в остаточном расплаве; 2) перераспределение SiO_2 , Al_2O_3 и щелочных элементов вследствие обменных реакций; 3) изменение степени насыщения расплава по Zr–Ti–PЗЭ-компонентам. Совокупность этих процессов закономерно приводит к локальной кристаллизации концентраторов HFSE и PЗЭ (циркон, титанит, соросиликаты группы чевкинита), это позволяет сформулировать вывод о том, что достаточным условием является реакционное взаимодействие расплава с кристаллизующейся минеральной массой – без привлечения иных внешних факторов, таких как более поздние гидротермальные растворы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что рудная минерализация может зарождаться в виде дисперсных, субмикронных, реакционно-контролируемых минеральных фаз в результате перераспределения вещества в ходе перекристаллизации кристаллизованной массы на контакте с расплавом. Полученные результаты объясняют, почему наблюдаемые в природных щелочных комплексах рудные фазы часто поздние, локализованы и привязаны к реакционным зонам. Также появились основания предположить, что для развития и роста рудной минерализации необходима последующая эволюция или реактивация магмы (охлаждение, активность флюидов, фракционирование или внедрение новой порции расплава).

Полученные результаты напрямую применимы к сиенитам массива Бурпала:

1) при многофазном процессе формирования массива, поздние, насыщенные щелочами и летучими расплавы могли проникать в кристаллизующуюся массу ранних сиенитов;

2) это привело к перекристаллизации и обогащению краевых зон амфиболов и клинопироксенов Mn, Sr, LREE, Nb при относительной общей макроскопической устойчивости кристаллов полевых шпатов и одновременной активности их поверхностей в ионно-обменных реакциях;

3) одновременно с этим происходит осаждение Zr, Ti, Nb, PЗЭ в виде циркона, Zr-титанита и Zr-Ti-PЗЭ-силикатов в интерстициальных расплавных линзах и вдоль контактов таких расплавов с вмещающими минералами;

4) кристаллизация циркона/титанита приводит к снижению содержания Zr и Hf в краевых частях клинопироксенов по сравнению с центральными.

Таким образом, эксперименты показывают, что зарождение редкометалльной минерализации в сиенитах возможно уже на высокотемпературном магматическом этапе становления щелочных массивов в зоне контакта между кристаллизующейся массой и межзерновым расплавом. В этой зоне амфибол, клинопироксен и сопутствующие силикатные фазы вовлекаются в реакционное взаимодействие с расплавом; при этом амфибол и клинопироксен выступают буфером редких элементов. По мере изменения состава расплава вблизи контакта и роста его локальной насыщенности несовместимыми элементами происходят перераспределение HFSE и PЗЭ и выделение акцессорных рудных фаз Zr, Ti и PЗЭ (циркона, титанита, минералов группы чевкинита) из локально обогащенного остаточного расплава. Применительно к массиву Бурпала это позволяет связать редкометалльную специализацию не только с поздними постмагматическими гидротермальными процессами, но и с ранними магматическими стадиями эволюции сиенитовой системы, когда в контактовых зонах между порциями расплава и кристаллизующейся массой создаются условия для концентрации и осаждения HFSE и PЗЭ в виде рудных акцессориев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дорошкевич А.Г., Саватенков В.М., Малютин А.В., Избродин И.А., Прокопьев И.Р., Старикова А.Е., Радомская Т.А. (2025) Петрогенезис и источники вещества пород щелочного редкометалльного массива Бурпала, Северное Прибайкалье. *Петрология*, **33**(1), 45-67. <https://doi.org/10.31857/S0869590325010035>. EDN: VDWYRY
- Избродин И.А., Дорошкевич А.Г., Малютин А.В., Семенова Д.В., Радомская Т.А., Крук М.Н., Прокопьев И.Р., Старикова А.Е., Рампилов М.О. (2024) Геохронология пород щелочного массива Бурпала (Северное Прибайкалье): новые U-Pb данные. *Геодинамика и тектонофизика*, **15**(1), 0741. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0741>. EDN: RDVHJJ
- Старикова А.Е., Малютин А.В., Избродин И.А., Дорошкевич А.Г., Радомская Т.А., Исакова А.Т., Семенова Д.В., Корсаков А.В. (2024) Минералогическая и геохимическая характеристика циркона как отражение условий его образования на примере цирконов из пород Бурпалинского массива, Северное Прибайкалье. *Геодинамика и тектонофизика*, **15**(5), 0787. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-5-0787>. EDN: FDQAQS
- Coogan L.A., O'Hara M.J. (2015) MORB differentiation: In situ crystallization in replenished-tapped magma chambers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **158**, 147-161. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.03.010>
- Cooper G.F., Davidson J.P., Blundy J.D. (2016) Plutonic xenoliths from Martinique, Lesser Antilles: evidence for open system processes and reactive melt flow in island arc crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **171**, 87. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1299-8>
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatenkov V.M. (2012) Alkaline magmatism of the Vitim province. *Lithos*, **152**, 157-172. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.002>
- Fang J., Chou I.-M., Audétat A., Zhang L. (2024) Quantitative redox measurements for hydrothermal experiments conducted in cold-seal pressure vessels. *Chem. Geol.*, **663**. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122286>
- Jackson M.D., Blundy J., Sparks R.S.J. (2018) Chemical differentiation, cold storage and remobilization of magma in the Earth's crust. *Nature*, **564**, 405-409. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0746-2>
- Kotov A.B., Vladykin N.V., Yarmolyuk V.V., Sal'nikova E.B., Sotnikova I.A., Yakovleva S.Z. (2013) Permian Age of the Burpala Alkaline Pluton, Northern Transbaikalia: Geodynamic Implications. *Dokl. Earth Sci.*, **453**, 1082-1085. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13110160>
- Lissenberg C.J., MacLeod C.J. (2016) A Reactive Porous Flow Control on Mid-ocean Ridge Magmatic Evolution. *J. Petrology*, **57**(11-12), 2195-2220. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw074>
- Matthews W., Linnen R.L., Guo Q. (2003) A filler-rod technique for controlling redox conditions in cold-seal pressure vessels. *Amer. Miner.*, **88**, 701-707.
- Morimoto N. (1988) Nomenclature of Pyroxenes. *Mineral. Petrol.*, **39**, 55-76.
- O'Neill H.S.C., Jenner F. (2012) The global pattern of trace-element distributions in ocean floor basalts. *Nature*, **491**, 698-704. <https://doi.org/10.1038/nature11678>
- Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G.G. (2016) Origin of REE-rich ferrocarbonatites in southern Siberia (Russia): implications based on melt and fluid inclusions. *Mineral. Petrol.*, **110**, 845-859. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0449-z>
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A., Redina A. (2023) Brine-Melts and Fluids of the Fe-F-P-(Ba)-(Sr)-REE Central Asian Carbonatite Province (Southern Siberia and Mongolia): The Petrogenetic Aspects. *Minerals*, **13**(4), 573. <https://doi.org/10.3390/min13040573>
- Rytsk E.Yu., Velikoslavinskii S.D., Smyslov S.A., Kotov A.B., Glebovitskii V.A., Bogomolov E.S., Tolmacheva E.V., Kovach V.P. (2017) Geochemical Peculiarities

- and Sources of Late Paleozoic High-K and Ultrapotassic Syenite of the Synnyr and Tas Massifs (Eastern Siberia). *Dokl. Earth Sci.*, **476**, 1043-1047. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17090070>
- Tsygankov A.A. (2014) Late Paleozoic Granitoids in Western Transbaikalia: Sequence of Formation, Sources of Magmas, and Geodynamics. *Russ. Geol. Geophys.*, **55**(2), 153-176. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.004>
- Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Khubanov V.B., Buyantuev M.D. (2017) Geodynamics of Late Paleozoic Batholith-Forming Processes in Western Transbaikalia. *Petrology*, **25**, 396-418. <https://doi.org/10.1134/S0869591117030043>
- Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Kozlovsky A.M. (2013) Late Paleozoic – Early Mesozoic Within-Plate Magmatism in North Asia: Traps, Rifts, Giant Batholiths, and the Geodynamics of Their Origin. *Petrology*, **21**, 101-126. <https://doi.org/10.1134/S0869591113010062>
- Zhu S.-Z., Huang X.-L., Yu Y., Yang F., Wang C.Y., He P.-L., Cao J. (2023) Enrichment of Incompatible Elements in Alkaline Syenites in Large Igneous Provinces Due to Magma Replenishment and Reactive Porous Flow in a Mush Reservoir. *J. Petrology*, **64**(2), egad002. <https://doi.org/10.1093/petrology/egad002>
- Kotov A.B., Vladykin N.V., Yarmolyuk V.V., Sal'nikova E.B., Sotnikova I.A., Yakovleva S.Z. (2013) Permian Age of the Burpala Alkaline Pluton, Northern Transbaikalia: Geodynamic Implications. *Dokl. Earth Sci.*, **453**, 1082-1085. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13110160>
- Lissenberg C.J., MacLeod C.J. (2016) A Reactive Porous Flow Control on Mid-ocean Ridge Magmatic Evolution. *J. Petrology*, **57**(11-12), 2195-2220. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw074>
- Matthews W., Linnen R.L., Guo Q. (2003) A filler-rod technique for controlling redox conditions in cold-seal pressure vessels. *Amer. Miner.*, **88**, 701-707.
- Morimoto N. (1988) Nomenclature of Pyroxenes. *Mineral. Petrol.*, **39**, 55-76.
- O'Neill H.S.C., Jenner F. (2012) The global pattern of trace-element distributions in ocean floor basalts. *Nature*, **491**, 698-704. <https://doi.org/10.1038/nature11678>
- Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G.G. (2016) Origin of REE-rich ferrocarbonatites in southern Siberia (Russia): implications based on melt and fluid inclusions. *Mineral. Petrol.*, **110**, 845-859. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0449-z>
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A., Redina A. (2023) Brine-Melts and Fluids of the Fe-F-P-(Ba)-(Sr)-REE Central Asian Carbonatite Province (Southern Siberia and Mongolia): The Petrogenetic Aspects. *Minerals*, **13**(4), 573. <https://doi.org/10.3390/min13040573>
- Rytsk E.Yu., Velikoslavinskii S.D., Smyslov S.A., Kotov A.B., Glebovitskii V.A., Bogomolov E.S., Tolmacheva E.V., Kovach V.P. (2017) Geochemical Peculiarities and Sources of Late Paleozoic High-K and Ultrapotassic Syenite of the Synnyr and Tas Massifs (Eastern Siberia). *Dokl. Earth Sci.*, **476**, 1043-1047. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17090070>
- Starikova A.E., Malyutina A.V., Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Radomskaya T.A., Isakova A.T., Semenova D.V., Korsakov A.V. (2024) Mineralogical, petrographic and geochemical evidence for zircon formation conditions within the Burpala massif, Northern Baikal region. *Geodynamics & Tectonophysics*, **15**(5), 0787. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-5-0787>
- Tsygankov A.A. (2014) Late Paleozoic Granitoids in Western Transbaikalia: Sequence of Formation, Sources of Magmas, and Geodynamics. *Russ. Geol. Geophys.*, **55**(2), 153-176. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.004>
- Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Khubanov V.B., Buyantuev M.D. (2017) Geodynamics of Late Paleozoic Batholith-Forming Processes in Western Transbaikalia. *Petrology*, **25**, 396-418. <https://doi.org/10.1134/S0869591117030043>
- Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Kozlovsky A.M. (2013) Late Paleozoic – Early Mesozoic Within-Plate Magmatism in North Asia: Traps, Rifts, Giant Batholiths, and the Geodynamics of Their Origin. *Petrology*, **21**, 101-126. <https://doi.org/10.1134/S0869591113010062>
- Zhu S.-Z., Huang X.-L., Yu Y., Yang F., Wang C.Y., He P.-L., Cao J. (2023) Enrichment of Incompatible Elements in Alkaline Syenites in Large Igneous Provinces Due to Magma Replenishment and Reactive Porous Flow in a Mush Reservoir. *J. Petrology*, **64**(2), egad002. <https://doi.org/10.1093/petrology/egad002>
- Coogan L.A., O'Hara M.J. (2015) MORB differentiation: In situ crystallization in replenished-tapped magma chambers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **158**, 147-161. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.03.010>
- Cooper G.F., Davidson J.P., Blundy J.D. (2016) Plutonic xenoliths from Martinique, Lesser Antilles: evidence for open system processes and reactive melt flow in island arc crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **171**, 87. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1299-8>
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatenkov V.M. (2012) Alkaline magmatism of the Vitim province. *Lithos*, **152**, 157-172. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.002>
- Doroshkevich A.G., Savatenkov V.M., Malyutina A.V., Izbrodin I.A., Prokopyev I.R., Starikova A.E., Radomskaya T.A. (2025) Petrogenesis and Sources for Rocks of the Rare-Metal Alkaline Burpala Intrusion (Northern Baikal Region). *Petrology*, **33**, 40-61 (translated from *Petrologiya*, **33**(1), 45-67). <https://doi.org/10.1134/S0869591124700280>
- Fang J., Chou I.-M., Audétat A., Zhang L. (2024) Quantitative redox measurements for hydrothermal experiments conducted in cold-seal pressure vessels. *Chem. Geol.*, **663**. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122286>
- Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Malyutina A.V., Semenova D.V., Radomskaya T.A., Kruk M.N., Prokopyev I.R., Starikova A.E., Rampilov M.O. (2024) Geochronology of alkaline rocks from the Burpala massif (Northern Pribaikalye): new U-Pb data. *Geodynamics & Tectonophysics*, **15**(1), 0741. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0741>
- Jackson M.D., Blundy J., Sparks R.S.J. (2018) Chemical differentiation, cold storage and remobilization of magma in the Earth's crust. *Nature*, **564**, 405-409. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0746-2>