

На правах рукописи



МАЛЮТИНА Александра Владиславовна

**ПЕТРОГЕНЕЗИС ЩЕЛОЧНОГО СИЕНИТОВОГО МАССИВА
БУРПАЛА (СЕВЕРНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)**

1.6.3 – Петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск.

Научный руководитель:

Дорошкевич Анна Геннадьевна, д.г.-м.н., заведующая лабораторией рудоносности щелочного магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Официальные оппоненты:

Савко Константин Аркадьевич, д.г.-м.н., профессор кафедры минералогии, петрографии и полезных ископаемых Воронежского государственного университета (ФГБОУ ВО «ВГУ», г. Воронеж).

Полин Владимир Федорович, к.г.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории генетической минералогии и петрологии Дальневосточного геологического института (ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН, г. Иркутск).

Защита состоится «6» октября 2025 года в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.050.01, созданного на базе ФГБУН ИГМ СО РАН, в конференц-зале (630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovery/d-003-067-03/zashchity>

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Котлярову А.В.

Тел./факс: +7 (383) 373-05-18; +7(383) 373-05-61, e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru.

Автореферат разослан «3» сентября 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.050.01,

к.г.-м.н.



А.В. Котляров

Актуальность

Изучение щелочного магматизма представляет огромный интерес для моделирования процессов, происходящих в литосферной мантии, включая мантийный метасоматоз, мантийно-коровые взаимодействия, генерацию и эволюцию родоначальных щелочных магм и формирования связанной с ними рудной минерализации, поскольку щелочные породы являются источником крупнейших в мире месторождений ниобия, циркония, стронция, редкоземельных элементов, фосфора и многих других рудных элементов.

Массив Бурпала представляет собой щелочную сиенитовую интрузию центрального типа и входит в состав позднепалеозойской Северо-Байкальской щелочной провинции. В пределах провинции выделяется более 10 разноразмерных интрузий, в том числе, крупнейший ультракалиевый массив Сынныр, щелочные массивы Якша, Тасс, Южный Сакун, Аkit и другие (Жидков, 1956, 1961; Жидков и др., 1963). Бурпала, в отличие от Сынныра, не имеет калиевую специализацию и по характеру металлогении больше схож с массивами Кольского полуострова: Хибинским и Ловозерским (Архангельская, 1974), – т.е. содержит широкий набор РЗЭ- и Zr-Ti-минералов (многие из которых крайне редки или открыты впервые на массиве). Ввиду этого массив, в основном, изучался как минералогический «заповедник» (Портнов, 2018): исследователи преимущественно уделяли внимание редкометальным минералам, рассматривая их в качестве концентраторов рудного сырья (в особенности на Nb, Zr, Th, Li, Be и В, Жидков, 1956, 1961; Жидков и др., 1963; Портнов, 1965; 2018; Архангельская, 1967; Портнов и Нечаева, 1967; Андреев, 1981; Владыкин, 1997; Сотникова, 2009).

Вопросам петрогенезиса массива Бурпала посвящено несколько работ Н.В. Владыкина и И.А. Сотниковой с соавторами, в которых образование массива рассматривается в рамках единого процесса дифференциации щелочной магмы, изначально обогащенной редкими элементами (Владыкин 1997; Владыкин и Миузаки, 2001; Сотникова, 2009; Сотникова и Владыкин, 2012; Владыкин и др., 2014; Vladykin and Sotnikova, 2017). При этом существование когенетичных кварцевых и нефелиновых сиенитов остается проблематичным из-за «теплового барьера» в системе $\text{Ne-Ks-Q-H}_2\text{O}$, где расплав может эволюционировать либо к гранитному, либо к нефелин-сиенитовому минимуму. Эта парадоксальная ассоциация поднимает вопрос важности не только процесса фракционной кристаллизации в эволюции

исследуемого комплекса, но ассимиляции щелочными расплавами корового вещества. Комбинация FCA-процессов с вариативным соотношением фракционирования и ассимиляции может объяснить наблюдаемые геохимические противоречия, что актуализирует необходимость комплексного подхода к изучению магматической эволюции подобных комплексов.

Цели и задачи

Цель: определить возраст основных разновидностей пород массива Бурпала, дать характеристику их источников вещества и разработать петрогенетическую модель образования массива.

Задачи:

- Обобщить и проанализировать опубликованные данные по проблемам щелочно-сиенитового магматизма, геологическому строению и истории изучения массива Бурпала и магматизму Северо-Байкальского региона в контексте данного исследования;
- Провести геохронологические исследования (U-Pb, LA ICP MS, циркон) основных разновидностей пород массива: нефелиновых, щелочных безнефелиновых и кварцевых сиенитов;
- Получить комплексную петрографическую, минералогическую, петрохимическую и геохимическую характеристику пород, включающую сравнительный анализ составов и распределения редких элементов;
- Выявить особенности макро- и микроэлементного состава темноцветных минералов из каждой группы пород;
- Дать изотопно-геохимическую (Sr, Nd, Pb, O) характеристику пород и отдельных минералов, включая сравнительный анализ их состава.

Объект исследования. Для достижения поставленных целей и задач были изучены породы, слагающие массив Бурпала: нефелиновые, щелочные и кварцевые сиениты.

Фактический материал и методы исследования

Диссертационная работа основана на фактическом материале, отобранном с участием автора в ходе экспедиционных работ в 2022 г. В процессе исследования были использованы различные аналитические методы: рентгено-флуоресцентный анализ, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (25 проб), U-Pb (LA ICP MS) изотопно-

геохронологические исследования цирконов (59 точечных анализов), сканирующая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ (173 анализа клинопироксена, 205 анализов амфибола, 115 анализов слюды). Вышеперечисленные исследования выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Определение содержаний редких элементов в клинопироксенах (55 анализов) и амфиболах (47 анализов) проводилось в Институте неорганической химии (ИНХ СО РАН, г. Новосибирск) методом масс-спектрометрии с лазерной абляцией на приборе NewWaveResearch 213 (Elemental Scientific).

Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$, 11 измерений) в силикатах и фосфатах определялся в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 с использованием метода лазерного фторирования (Sharp, 1990).

Sr-Nd-Pb изотопные исследования (19 измерений) в породах и минералах (полевой шпат) проведены в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (г. Санкт-Петербург). Соотношения изотопов Sr и Nd в породах измерялись на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI (Finnigan MAT, Германия).

Личный вклад автора диссертации заключался в участии в полевых работах и отборе проб; петрографическом изучении главных разновидностей пород; подготовке проб для дальнейших минералогических, геохимических и изотопных исследований; обработке и интерпретации полученных минералогических, геохимических и изотопно-геохимических данных.

Практическая значимость

Полученные результаты позволили уточнить возрастные рамки образования массива и источники вещества пород, а также его временную и генетическую связь с позднепалеозойскими щелочными массивами в пределах Северо-Байкальской и Витимской щелочных провинций. Полученная петрогенетическая модель образования массива является основополагающей для понимания процессов оруденения в данном и подобных комплексах, она может способствовать разработке критериев поисков и прогноза аналогичных рудопроявлений, что крайне актуально для снижения сырьевой зависимости и развития стратегических отраслей промышленности.

Научная новизна

Впервые были определены особенности редкоэлементного состава темноцветных минералов, которые позволили выявить специфику эволюции щелочно-сиенитового расплава, отражающую накопление редких элементов и щелочей при кристаллизации нефелиновых сиенитов. Эти сведения, наряду с геохронологическими данными, подтвердили механизм импульсного становления массива. В результате исследования были получены обширные представительные данные по Nd-Sr-Pb изотопному составу для основных групп пород, слагающих массив Бурпала. Впервые проведен анализ изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$) в минералах сиенитов, соответствующих основным фазам массива. Комплексный анализ полученных изотопно-геохимических показателей позволил дать характеристику мантийного источника для пород, а также определить вклад коровой компоненты при становлении массива. Представленный впервые сравнительный анализ изотопно-геохимических характеристик пород массива Бурпала с щелочными магматическими комплексами Забайкальского региона и южной окраины Сибирского кратона свидетельствует о вкладе различных источников, участвовавших в их формировании.

Защищаемые положения

1. Нефелиновые, щелочные безнефелиновые и кварцевые сиениты массива Бурпала имеют когенетическое происхождение и сформировались в интервале 300-289 млн лет.
2. Сосуществование нефелиновых (нефелин-нормативных) и щелочных кварцевых (кварц-нормативных) сиенитов является следствием контаминации порций магм, кристаллизующих кварцевые (кварц-нормативные) сиениты, коровым/сиалическим веществом.
3. Источником вещества для первичных расплавов, продуцирующих породы массива Бурпала, была изотопно-обогащенная метасоматизированная литосферная мантия.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертационной работы были представлены в виде устных докладов на международной конференции «Геодинамика и минерагения Северной Евразии» в г. Улан-Удэ (2023), на Всероссийских конференциях «Щелочной и кимберлитовый магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов и алмазов» в г. Апатиты (2023)

и «Глубинный магматизм, его источники и плюмы» в г. Иркутске (2024). Результаты исследований по теме диссертации изложены в 5 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, 8 глав, заключения и списка литературных источников. Общий объем диссертации составляет 132 страницы. В работе содержатся 23 рисунка и 10 приложений. Список литературы включает 331 источник.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность за научное руководство и неоценимую поддержку на каждом этапе исследования и написания работы своему научному руководителю д.г.-м.н. А.Г. Дорошкевич. Особая благодарность всему коллективу лаборатории рудоносности щелочного магматизма № 215 ИГМ СО РАН, а также сотруднику ИГХ СО РАН Радомской Т.А. за их ценный вклад и помощь в проведении полевых и аналитических работ, подготовке статей и рукописи. Сотрудникам лаборатории термобарогеохимии № 436 ИГМ СО РАН к.г.-м.н. А.Е. Стариковой и д.г.-м.н. В.В. Шарыгину за их многократные консультации и важные рекомендации автор выражает свою искреннюю признательность.

Работа выполнена в рамках госзадания ИГМ СО РАН (122041400241-5) и при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-17-00078).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность, очерчиваются цели и задачи исследования. В **первой главе** описано современное состояние проблемы щелочного и, в частности, щелочно-сиенитового магматизма; приведена краткая история изучения Северо-Байкальской щелочной провинции. Во **второй главе** перечислены методы, использованные при петрографическом, геохронологическом, минералогическом, петролого-геохимическом и изотопно-геохимическом изучении пород массива Бурпала. **Третья глава** посвящена геологическому строению массива Бурпала. В **четвертой главе** дана петрографическая характеристика основных разновидностей пород массива Бурпала. В **пятой главе** представлены результаты U-Pb изотопно-геохронологических исследований пород массива.

В **шестой главе** описан химизм (включая редкоэлементный состав) темноцветных породообразующих минералов из пород массива. **Седьмая глава** посвящена петролого-геохимической и изотопно-геохимической (Sr, Nd, Pb, O) характеристике пород массива. В **восьмой главе** представлена дискуссия относительно полученных результатов исследования, проведена оценка вклада различных источников при формировании массива и предложена петрогенетическая модель его образования.

Геологическое строение массива Бурпала и петрографическая характеристика основных разновидностей пород

Массив Бурпала входит в состав позднепалеозойской Северо-Байкальской щелочной провинции, находящейся в зоне сочленения Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). Тектоническая позиция массива определяется его положением на границе западного сегмента Байкало-Витимского пояса ЦАСП с краевой частью Сибирского кратона (рис. 1). Последняя представлена Маректинским выступом фундамента и неопротерозойскими рифтогенными структурами Олоkitской зоны. В.П. Костюк с соавторами (1990) относили данный регион к Байкало-Становой рифтогенной системе. В западном сегменте Байкало-Витимского комплекса совмещены раннебайкальские метаморфизованные вулканогенно-карбонатно-терригенные комплексы и позднебайкальские комплексы, включающие в себя гипербазитовый, мигматит-тоналит-метабазитовый, вулканогенно-осадочный и осадочный (породы холоднинской свиты терригенного комплекса, Андреев и др., 2022).

Массив Бурпала залегает в терригенно-осадочных вендских (?) породах холоднинской свиты и занимает на поверхности площадь около 250 км². Массив представляет собой интрузию центрального типа (рис. 2) и характеризуется зональной структурой, где в краевой части развиты массивные кварцевые и кварц-нормативные сиениты, а в центральной – щелочные полевошпатовые и нефелиновые сиениты, пуласкиты. Внешние контакты интрузии с вмещающими осадочными породами крутопадающие, интрузивные, сопровождающиеся зонами дробления и ороговикования (Жидков, 1961; Портнов, 1965). Приконтактные зоны массива (как экзо-, так и эндоконтакты) и пегматиты всех типов подверглись щелочному метасоматозу на позднемагматической и гидротермальной стадиях (Портнов,

1965). Метасоматиты экзоконтакта представлены фенитизированными роговиками, проработка которых максимальна в зонах повышенной проницаемости – зонах дробления. Метасоматоз эндоконтактовой зоны проявлен в виде маломощных (от первых см – до 20 и более метров) жилоподобных зон, которые группируясь прослеживаются на значительные расстояния вглубь массива. Они представлены альбититами, эгиринитами, эгирин-микроклиновыми образованиями и несут комплексную уран-торий-редкометальную минерализацию. Стоит отметить, что комплекс акцессорных минералов, содержащих Zr, редкоземельные элементы (РЗЭ), Nb, Be, Th присутствует не только в метасоматически преобразованных породах и пегматитах, но и в слабо измененных нефелиновых сиенитах, где некоторые редкометальные минералы образуют интерстициальные позднемагматические выделения (например, лорпарит-(Ce), ринкит-(Ce), бурпалит и др.).

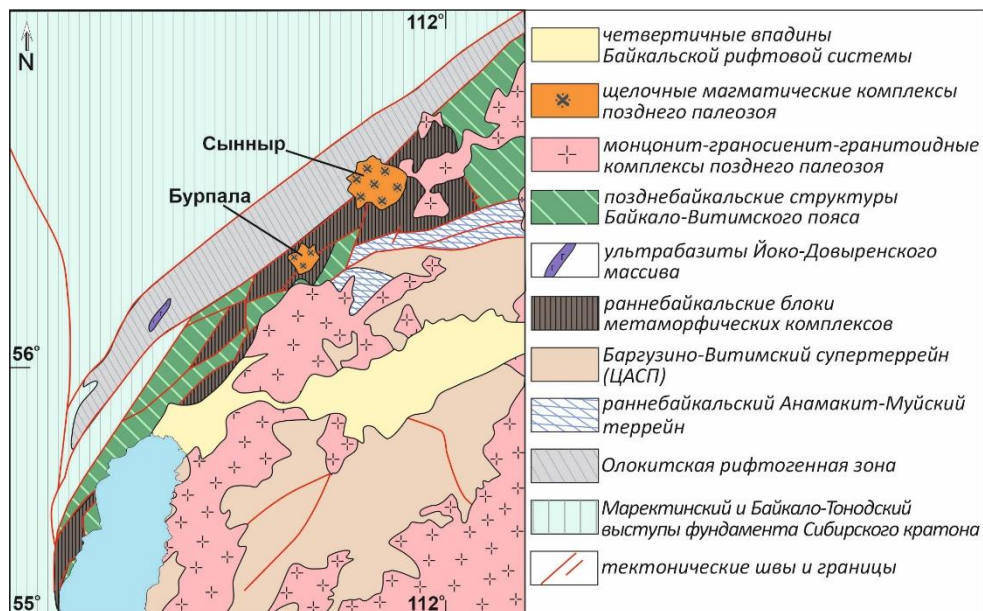


Рис. 1. Схема тектонического районирования Байкало-Витимского пояса (по Андреев и др., 2022).

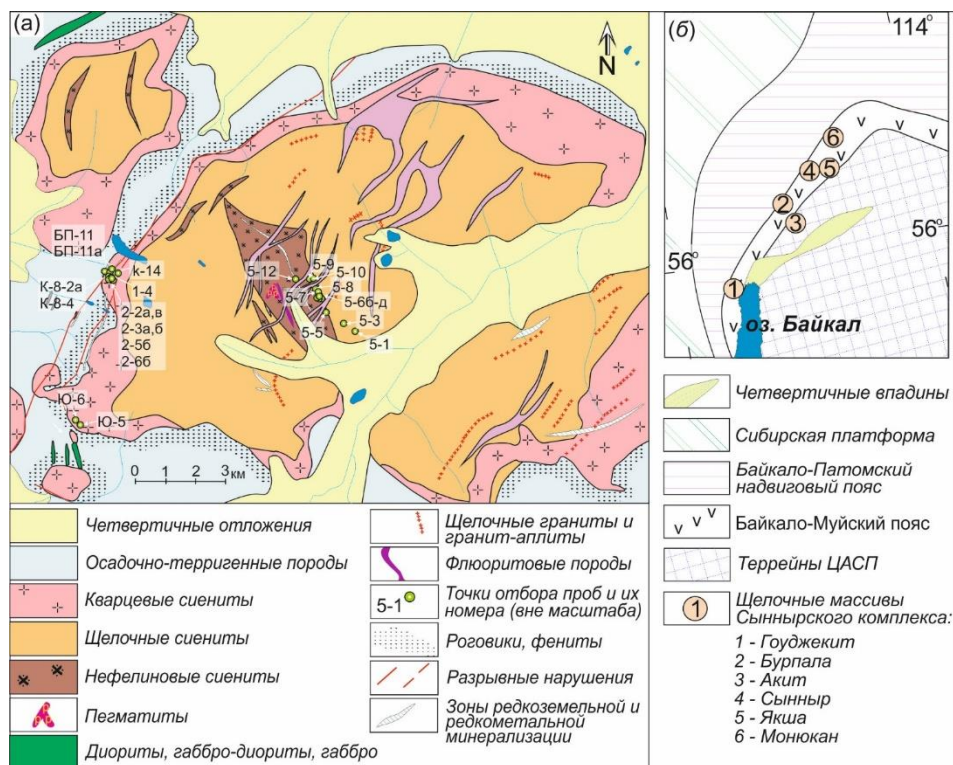


Рис. 2. (а) Схема геологического строения массива Бурпала по материалам (Архангельская, 1974; Vladikin and Sotnikova, 2017) с изменениями авторов. (б) Положение щелочных интрузий в структурах юга Сибирского кратона по материалам (Рыцк и др., 2017).

Краткая минералого-петрографическая и петролого-геохимическая характеристика основных разновидностей пород массива

На основе представительного каменного материала была изучена каждая группа сиенитов: щелочные безнефелиновые, нефелиновые и кварцевые.

Нефелиновые сиениты представляют собой нефелин-содержащие и нефелин-нормативные мелко-среднезернистые породы с массивной и трахитоидной текстурой; сложены преимущественно калиевым полевым

шпатом (~ 40-50 %), клинопироксеном (~ 15-20 %), нефелином (~ 10 %), часто присутствует содалит (~ 10 %). В качестве второстепенных минералов отмечаются слюда (~ 5-10 %), амфибол (~ 2-7 %) и плагиоклаз (~ 4-5 %), изредка скаполит. Из акцессорных минералов встречаются циркон, фторапатит, алланит-(Ce), лопарит-(Ce), флюорит, ловенит, магнетит, пирофанит и титанит.

Щелочные сиениты представлены мелкозернистыми разновидностями, сложены калиевым полевым шпатом (~ 60 %), щелочным амфиболом (~ 10-15 %), клинопироксеном (~ 5-10 %), плагиоклазом (~ 7-9 %) и слюдой (~ 5-8 %). Акцессорные минералы представлены цирконом, фторапатитом, флюоритом, магнетитом, пирофанитом, титанитом.

Кварцевые сиениты представлены среднезернистыми массивными породами и сложены преимущественно калиевым полевым шпатом (~ 60 %), плагиоклазом (~ 15 %) и амфиболом (~ 15 %). В качестве второстепенных минералов отмечаются кварц (~ 1-10 %) и изредка реликтовый клинопироксен (диопсид). Акцессорные минералы представлены магнетитом, пирофанитом, титанитом, фторапатитом, цирконом, иногда алланитом-(Ce).

Диаграммы отношений SiO_2 к основным компонентам (рис. 3) не выявляют четкой корреляции между кремнекислотностью пород и изменением содержания компонентов в нефелиновых, щелочных безнефелиновых и кварцевых сиенитах, а также шонкинитах (щелочных габброидах ранней фазы, выделенных Владыкиным с соавторами, 2014). Поля составов нефелиновых сиенитов наиболее приближены к таковым для шонкинитов, по сравнению с щелочными и кварцевыми, при этом большинство нефелиновых сиенитов характеризуется более варьирующими и высокими концентрациями Zr, Nb и PЗЭ по сравнению с другими группами пород. Для щелочных сиенитов прослеживается тенденция нахождения полей их состава в промежуточном положении между нефелиновыми и кварцевыми разновидностями, при этом вариации основных компонентов для них в значительной степени перекрываются с таковыми для группы кварцевых сиенитов, отличаясь более широким разбросом значений. Поля составов кварцевых сиенитов, в основном, характеризуются наиболее низкими концентрациями Ti, Fe, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, а также наиболее высокими Al_2O_3 по сравнению с нефелиновыми и щелочными разновидностями.

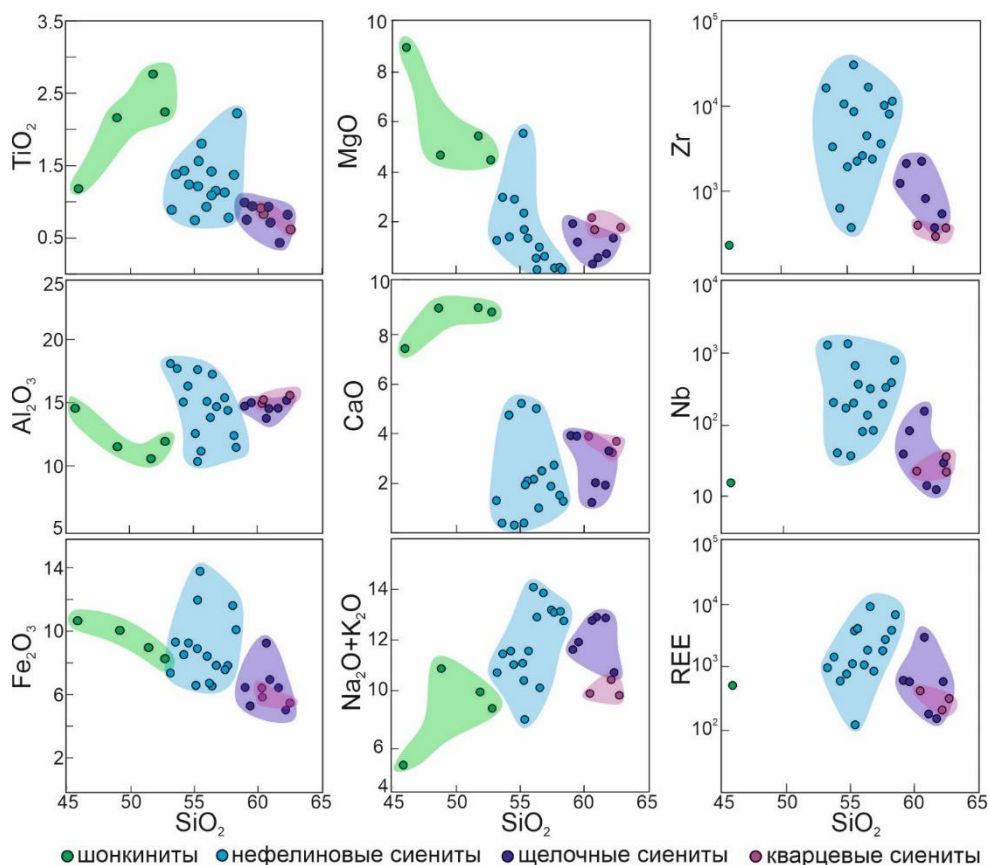


Рис. 3. Вариации содержаний основных петрогенных (мас. %) и редких (г/т) компонентов в основных разновидностях пород массива Бурпала. Данные по шонкинитам взяты из работы (Владыкин и др., 2014).

Графики распределения редкоземельных элементов (РЗЭ), нормированных к хондриту (рис. 4), для всех типов пород массива демонстрируют обогащение легкими лантаноидами относительно тяжелых. Нефелиновые сиениты характеризуются более высокими концентрациями РЗЭ по сравнению с щелочными и кварцевыми сиенитами, а также с шонкинитами. Отношение $(La/Yb)_N$ в нефелиновых сиенитах варьирует от 12

до 24, в щелочных сиенитах – от 14 до 31, в кварцевых сиенитах – от 17 до 24, а в образце шонкинита составляет 25. Мультиэлементные диаграммы для всех типов пород демонстрируют обогащение Th, U и РЗЭ относительно Nb, Ta и Ti, а также обогащение Pb относительно соседних элементов. Нефелиновые сиениты отличаются повышенными содержаниями Zr-Hf и Nb-Ta по сравнению с щелочными и кварцевыми сиенитами.

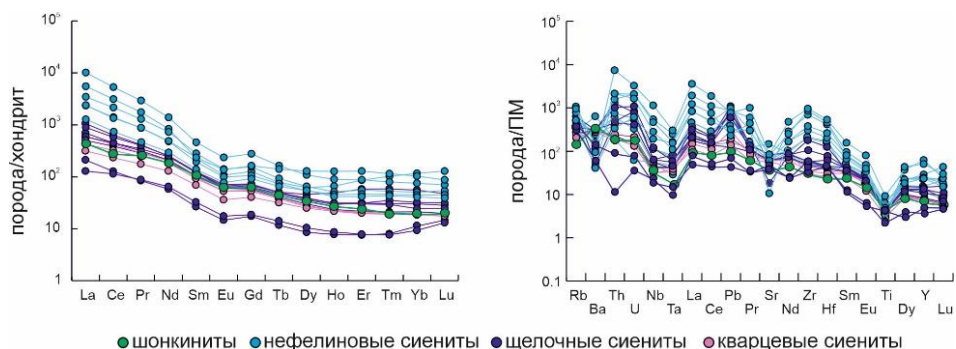


Рис. 4. Содержания РЗЭ и редких элементов в породах массива Бурпала, нормированные к хондриту и примитивной мантии (ПМ) (по Sun and McDonough, 1989), соответственно. Данные по шонкиниту взяты из работы (Владыкин и др., 2014).

Sr-Nd изотопные характеристики пород массива Бурпала (рис. 5 а) демонстрируют следующие особенности: нефелиновые сиениты имеют узкий диапазон первичных $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношений (0.7080-0.7084). Их $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(\text{I})$ отношения варьируют от 0.511671 до 0.511704, а $\epsilon\text{Nd}(\text{T})$ на 290 млн лет составляет от (-10.9) до (-11.6). Щелочные и кварцевые сиениты показывают сходные с нефелиновыми сиенитами $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{I})$ отношения. Для щелочных сиенитов они составляют 0.7080-0.7089, за исключением одного образца рудоносного щелочного сиенита (0.7128, образец БП-116), в котором внешне не наблюдается признаков вторичных изменений. Для кварцевых сиенитов $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ варьируют в диапазоне 0.7080-0.7086. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(\text{I})$ отношения в щелочных сиенитах варьируют в более широком интервале, от 0.511685 до 0.511730, в сравнении с нефелиновыми сиенитами, а ϵNd (290 млн лет) равны (-10.4) – (-11.7). Кварцевые сиениты характеризуются, в целом, более

высокими $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(\text{I})$ отношениями (0.511704-0.51174), а значения ϵNd (290 млн лет) варьируют от (-10.2) до (-10.9).

На диаграмме в координатах $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 5 б) породы массива образуют линейный тренд. Точки состава нефелиновых сиенитов тяготеют к левой нижней части тренда и демонстрируют более примитивный изотопный состав свинца, в то время как щелочные и кварцевые сиениты характеризуются более радиогенным составом Pb. Верхняя часть тренда пород массива Бурпала занимает точку, соответствующую изотопному составу образца вмещающего песчаника холоднинской свиты.

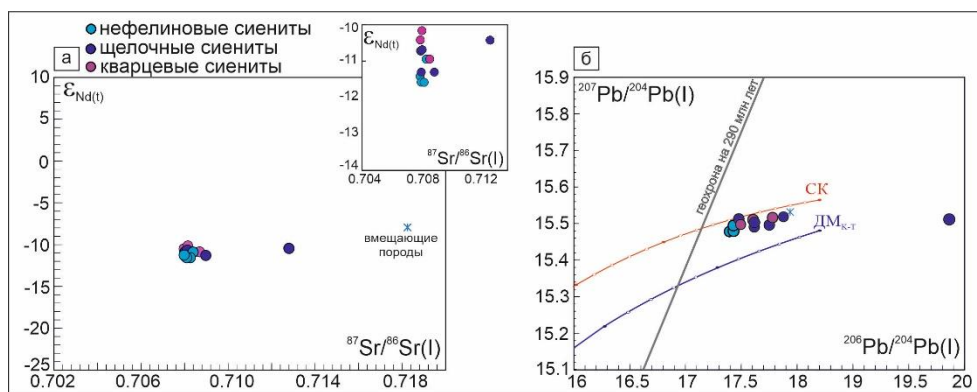


Рис. 5. $\epsilon\text{Nd}(\text{t}) - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{I})$ изотопные отношения (а) и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(\text{I}) - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(\text{I})$ диаграмма (б) для пород массива Бурпала. СК – эволюция Pb в Сибирском кратоне, согласно (Ларин и др., 2021); ДМк-т – эволюция Pb в деплетированной мантии, согласно (Kramers and Tolstikhin, 1997).

Особенности состава темноцветных минералов из разных групп сиенитов демонстрируют следующие закономерности:

Клинопироксен. Вариации макро- и микроэлементного состава клинопироксена в трех группах сиенитов представлены на рис. 6 а. Минерал из нефелиновых сиенитов варьирует по составу от $\text{Di}_{32}\text{Hed}_{36}\text{Aeg}_{32}$ до $\text{Di}_1\text{Hed}_7\text{Aeg}_{92}$. Графики распределения РЗЭ, нормированных к хондриту (рис. 6 б), имеют синусоидальный характер, с платообразным распределением в области легких лантаноидов. С увеличением доли эгиринового компонента в минерале (сопряженного с ростом кремнекислотности пород) возрастает содержание таких микроэлементов, как Zr, Ti и Sr, от 820, 1900 и 370 г/т до

4280, 9230 и 670 г/т, соответственно, а общее содержание РЗЭ варьирует от 232 до 140 г/т.

В пределах группы щелочных сиенитов состав минерала варьирует от $\text{Di}_{78}\text{Hd}_{19}\text{Ae}_3$ (в образцах с меньшим содержанием SiO_2) до $\text{Di}_1\text{Hd}_3\text{Ae}_{96}$ (в образцах с большим содержанием SiO_2) и имеет схожий тренд эволюции с таковым из нефелиновых сиенитов, но отличается большей вариацией MgO . Графики распределения РЗЭ характеризуются выраженной синусоидальностью, с прогибом в средних РЗЭ и субгоризонтальным распределением в легких лантаноидах. В целом, характер распределения РЗЭ в клинопироксене из щелочных сиенитов схож с таковым в минерале из нефелиновых сиенитов. Суммарные концентрации РЗЭ составляют до 105 г/т, концентрации Zr , Ti и Sr в эгиринах щелочных сиенитов в целом ниже, чем в эгиринах нефелиновых сиенитов и не превышают 1850, 5320 и 325 г/т, соответственно.

Эволюция состава клинопироксена из кварцевых сиенитов заметно отличается от двух предыдущих групп пород: минерал может варьировать по составу от $\text{Di}_{78}\text{Hd}_{21}\text{Ae}_1$ до $\text{Di}_1\text{Hd}_{65}\text{Ae}_{34}$, т.е. отсутствует явная эволюция в сторону эгиринового минерала и наблюдается обогащение Fe^{2+} по сравнению с Fe^{3+} , что может быть вызвано более восстановительными условиями при минералообразовании (Mann et al., 2006). По распределению РЗЭ клинопироксены из кварцевых сиенитов также отличаются от минерала двух предыдущих групп пород. На графиках конфигурации РЗЭ, нормированных к хондриту, они характеризуются явным преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми, с устойчивым падением от La к Ho и значительным подъемом от Ho к Lu . Общие содержания РЗЭ не превышают 84 г/т, концентрации Zr , Ti и Sr значительно ниже по сравнению с минералом нефелиновых и щелочных сиенитов и в среднем составляют 31, 657 и 61 г/т, соответственно.

Амфибол. Состав амфибола в нефелиновых сиенитах варьирует от Ca-Na до Na разностей, в щелочных сиенитах – от Ca до Na , в кварцевых сиенитах встречаются Ca разности (рис. 7). На графиках распределения РЗЭ, нормированных к хондриту (рис. 7), минерал демонстрирует слабую отрицательную европиевую аномалию: 0.75-0.67 в нефелиновых и 0.66-0.89 в кварцевых сиенитах. При этом для амфибола нефелинового сиенита характерно платообразное распределение легких лантаноидов, что, вероятно, связано с кристаллизацией ЛРЗЭ-содержащих фаз (лопарит-(Ce), фторapatит,

бурпалит и т.п.). Суммарные концентрации РЗЭ в Na-амфиболах нефелиновых сиенитов составляют 200 г/т, а содержания Zr, Ti и Sr – 4300, 9000 и 490 г/т, соответственно. При этом в минерале кварцевых сиенитов содержания РЗЭ не превышают 180 г/т, а концентрации Zr, Ti и Sr составляют в среднем 40, 5970 и 50 г/т, соответственно.

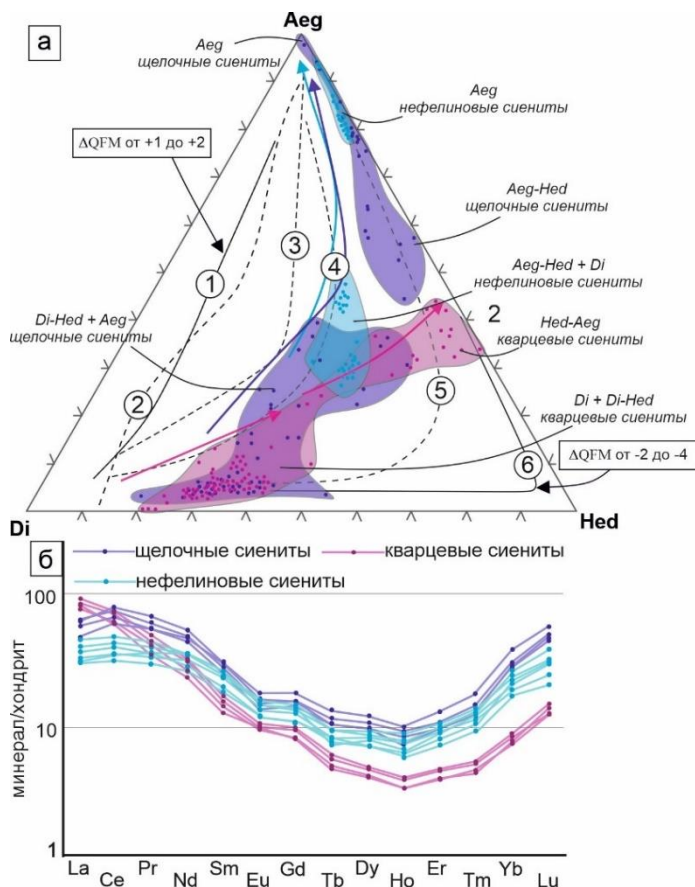


Рис. 6. (а) Особенности макроэлементного состава клинопироксенов из нефелиновых, щелочных и кварцевых сиенитов (стрелками обозначены тренды изменения составов). Тренды изменения составов клинопироксенов и оценки fO_2 из классических щелочных комплексов приведены по (Marks and Markl, 2001; Mann et

al., 2006). (б) Графики распределения РЗЭ в клинопироксенах, нормированные к хондриту, по (Sun and McDonough, 1989).

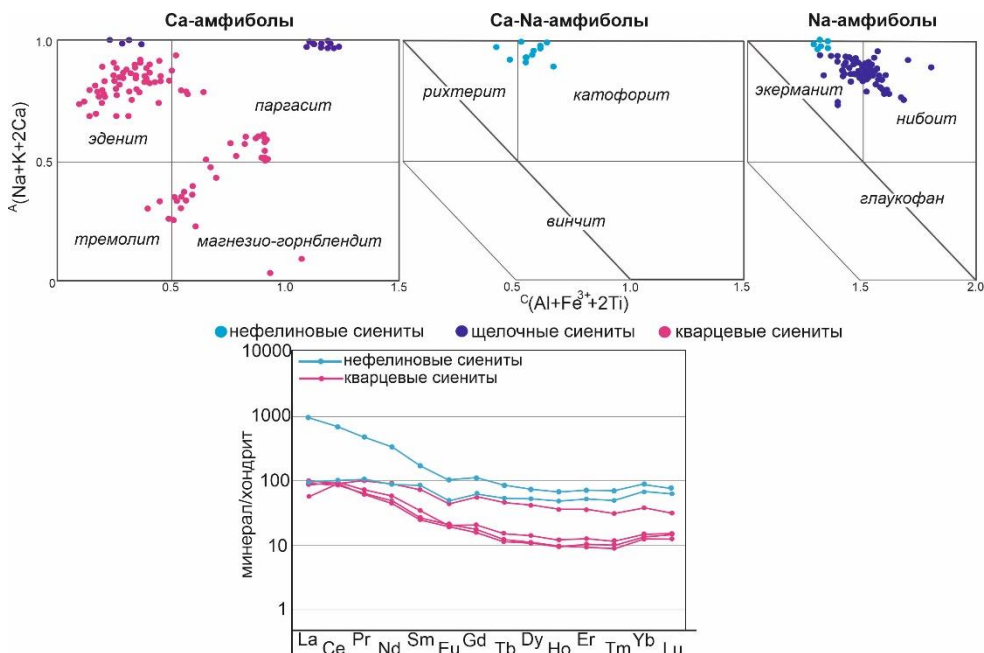


Рис. 7. Классификационные диаграммы для амфиболов нефелиновых, щелочных и кварцевых сиенитов, по (Hawthorne et al., 2012); ниже – графики распределения РЗЭ в амфиболах, нормированные к хондриту, по (Sun and McDonough, 1989).

Слюда. В большинстве случаев состав слюд приближен к составу фторфлогопита (рис. 8 а). При этом, в образцах нефелиновых, реже щелочных сиенитов выделяется еще одна разновидность слюды с повышенными концентрациями SiO_2 (48-50 мас. %) и F (до 7-7.5 мас. %) и дефицитом Al в тетраэдрической позиции (рис. 8 б). Такие особенности могут свидетельствовать о том, что данная разновидность является переходной от флогопита к тайниолиту. В щелочных сиенитах также встречаются разновидности, по составу больше приближенные к анниту, а в кварцевых сиенитах содержание MgO в слюде обычно выше по сравнению с нефелиновыми и щелочными сиенитами.

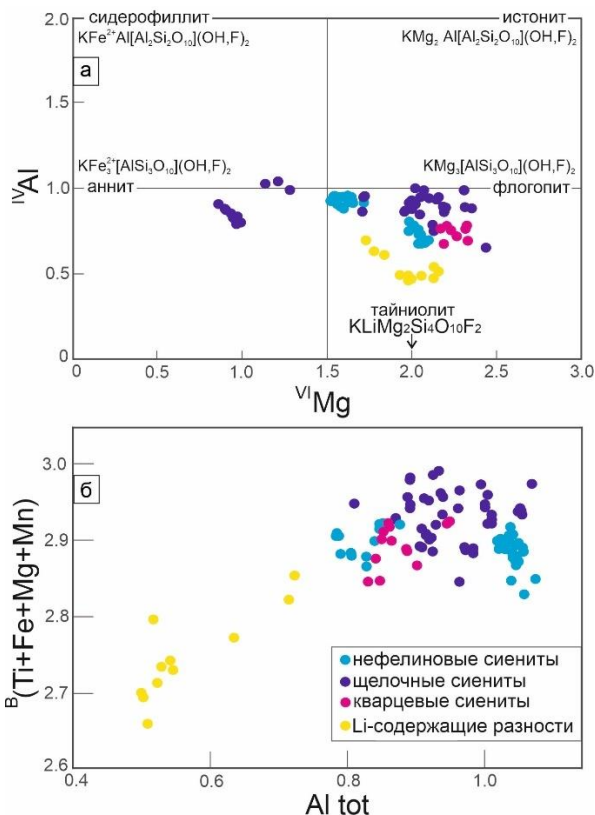


Рис. 8. (а) Особенности состава слюд из нефелиновых, щелочных и кварцевых сиенитов массива Бурпала по (Brod et al., 2001); (б) график зависимости общего содержания алюминия (ф.е.) от степени заселенности октаэдрической позиции.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение: *Нефелиновые, щелочные безнефелиновые и кварцевые сиениты массива Бурпала имеют когенетическое происхождение и сформировались в интервале 300-289 млн лет.*

Проведенные исследования показали, что как сами породы массива Бурпала, так и пороодообразующие минералы, характеризуются широкими вариациями как по основным, так и по РЗЭ и редким элементам. На

петрохимических бинарных диаграммах видны признаки фракционирования в пределах отдельно взятых групп пород, а также явная обогащенность нефелиновых сиенитов Nb, Zr, Ti, Sr и P3Э. При этом редкоземельные и мультиэлементные диаграммы демонстрируют схожую конфигурацию спектров для всех групп пород. Это свидетельствует об их генетическом родстве. Все группы пород также демонстрируют близкие Sr-Nd изотопные характеристики, указывающие на общий источник вещества.

Тренды эволюции составов темноцветных минералов имеют схожий характер, что говорит о генетическом родстве пород, но также демонстрируют признаки фракционирования в пределах каждой группы сиенитов.

Изотопно-геохронологические исследования нефелиновых, щелочных и кварцевых сиенитов были проведены U-Pb методом (LA ICP MS) по циркону. Цирконы из нефелиновых и щелочных сиенитов чаще представляют собой фрагменты короткопризматических и бипирамидальных зерен, которые в катодлюминесцентном (КЛ) изображении характеризуются секториальным строением с осцилляторной зональностью. В кварцевых сиенитах зерна обладают короткопризматическим габитусом с отчетливой до расплывчатой осцилляторной зональностью в КЛ изображениях, иногда характеризуется более темной ядерной частью с нарушенной зональностью. Исследования показали, что циркон из нефелиновых (обр. БР3 5-12) и щелочных сиенитов (обр. БР3 5-6) имеет абсолютный возраст 296 ± 2 млн лет ($n=13$) и 298 ± 2 млн лет ($n=15$), соответственно (рис. 9 а, б). Циркон из кварцевых (обр. Ю-5) и кварцсодержащих сиенитов (обр. к-14) демонстрирует абсолютный возраст 291 ± 2 ($n=14$) и 293 ± 3 млн лет ($n=8$), соответственно (рис. 9 в, г). Анализ полученных геохронологических данных показывает, что временные интервалы формирования основных типов пород массива Бурпала частично перекрываются, вследствие погрешности метода датирования. Тем не менее, полученные результаты свидетельствуют о достаточно длительном интервале становления пород массива $\sim 7-10$ млн лет, которое, вероятно, происходило в несколько магматических импульсов (Избродин и др., 2024; Старикова и др., 2024).

Раннепермское становление массива Бурпала сопоставимо по возрасту с Сыннырским плутоном (289.5 ± 3.2 млн лет, U-Pb, циркон, Izbrodin et al., 2017), с ийолит-уртитовыми и щелочно-сиенитовыми ассоциациями пород Витимской щелочной провинции (Мухальский, Верхне-Бурульзайский,

Инолоктинский, Чининский, Зимовьечинский, Тучинский и Комский массивы, Doroshkevich et al., 2012 a, b; 2014; Doroshkevich, 2013; Izbrodin et al., 2020; рис. 10). Эти внутриплитные щелочные комплексы формировались практически одновременно и объединены в пространственной и структурной сопряженности с дайковыми роями, базитовыми интрузиями и гранитоидами Ангаро-Витимского батолита (314-285 млн лет, Litvinovsky et al., 2011; Tsygankov et al., 2016; Цыганков и др., 2019; Khubanov et al., 2021 и ссылки в них), а также щелочно-базитовыми интрузиями, входящими в состав батолитового комплекса (Tsygankov et al., 2016 и ссылки в статье). Формирование последнего, несомненно, явилось наиболее крупным магматическим событием в раннепермской истории южного обрамления Сибирской платформы. Многими исследователями предполагается, что плюмовая концепция наиболее приближена к внутриплитной природе этих магматических комплексов и генерация первичных магм для них связана с процессами взаимодействия позднепалеозойского Сибирского плюма и древней континентальной коры (Doroshkevich et al., 2012; Yarmolyuk et al., 2013; Tsygankov, 2014; Tsygankov et al., 2017; Rytsk et al., 2017 и др.).

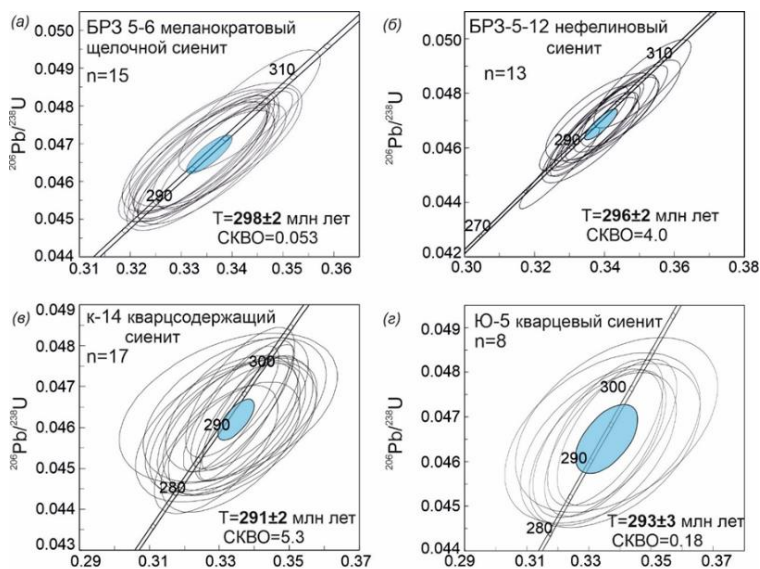


Рис. 9. Диаграммы с конкордией для цирконов из пород массива Бурпала.

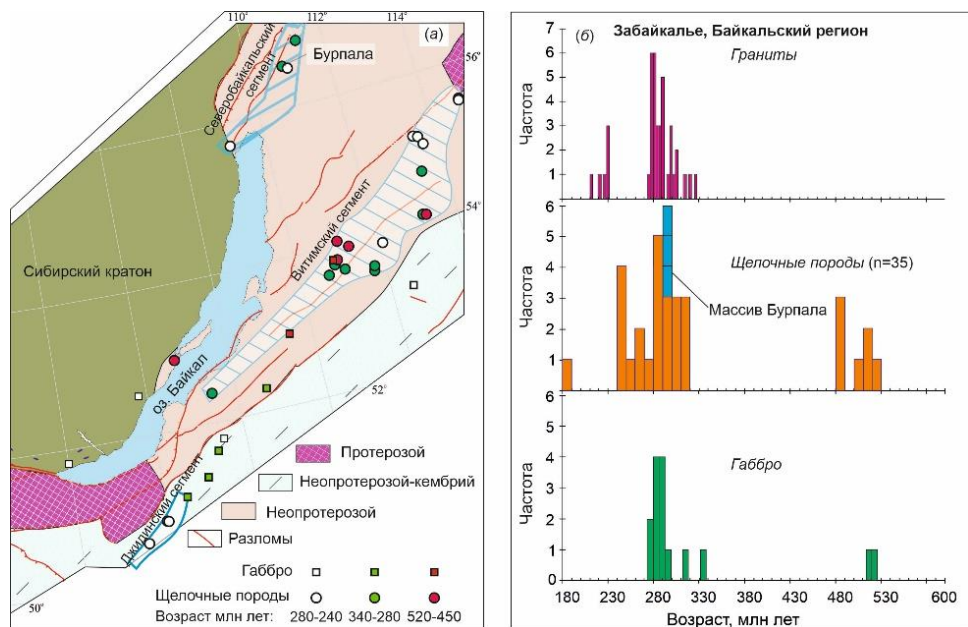


Рис. 10. (а) Схема размещения массивов палеозойских-раннемезозойских щелочных пород Западного Забайкалья. (б) Сводные гистограммы распределения геохронологических данных для пород массива Бурпала в сравнении с щелочными, основным и кислым породами Западного Забайкалья. Возрастные параметры взяты из работы (Izbrodin et al., 2020, 2022, ссылки в работе).

Второе защищаемое положение: *Сосуществование нефелиновых (нефелин-нормативных) и щелочных кварцевых (кварц-нормативных) сиенитов является следствием контаминации порций магм, кристаллизующих кварцевые (кварц-нормативные) сиениты, коровым/сиалическим веществом.*

На сегодняшний день в кругу ученых, специализирующихся на изучении щелочного магматизма, широко известна общая проблематика сосуществования SiO_2 -ненасыщенных (фельдшпатоидных) и SiO_2 -насыщенных (кварц-нормативных) и даже пересыщенных (кварцсодержащих) сиенитов в составе единых массивов. Довольно часто петролого-геохимические исследования указывают на их общий источник и

когенетическое происхождение (например, Foland et al., 1993; Riishuus et al., 2008; Estrade et al., 2014 и др.). В качестве ключевого механизма формирования таких ассоциаций все чаще предлагается модель фракционной кристаллизации – ассимиляции (FCA). В результате комбинации этих процессов могут кристаллизоваться как кварцсодержащие, так и фельдшпатоидные породы (например, Foland et al., 1993; Stevenson et al., 1997; Harris et al., 1999; Upton et al., 2003; Riishuus et al., 2008; Kogarko et al., 2010; Zhang et al., 2010; Doroshkevich et al., 2012; Estrade et al., 2014; Носова и др., 2019; Izbrodin et al., 2020; Vorontsov et al., 2021).

Известно, что модель образования фельдшпатоидных сиенитов, основанная на ассимиляции корового вещества может подразумевать взаимодействие кремний-насыщенной магмы с осадочными карбонатными породами (н-р: Foland et al., 1993; Harris et al., 1999; Upton et al., 2003; Riishuus et al., 2008 и др.). Однако для массива Бурпала данная модель не применима, поскольку вмещающие породы относятся к терригенно-осадочному типу (песчаники, алевролиты), а петрографические и минералогические особенности магматических пород массива не несут признаков ассимиляции карбонатного материала (карбонат отсутствует в породах массива). Петролого-геохимические исследования также опровергают эту возможность: в отличие от ожидаемого обеднения при взаимодействии с осадочными карбонатами, нефелиновые сиениты демонстрируют повышенные концентрации редкоземельных и высокозарядных элементов по сравнению с щелочными и кварцевыми сиенитами. Это свидетельствует об ином механизме эволюции исследуемой системы, не связанном с контаминацией карбонатным веществом. Объяснением сосуществования нефелиновых и кварцевых сиенитов в пределах единого массива может быть образование кварцевых, а не нефелиновых сиенитов в результате процесса коровой контаминации или анатексиса корового силикатного материала.

Чтобы выяснить, насколько значительным был вклад фракционной кристаллизации родительских расплавов и коровой контаминации при становлении массива, было проведено моделирование с помощью программы «FC-AFC-FCA and mixing modeler» (Ersoy and Helvacı, 2010) по составу РЗЭ. За начальный расплав был взят состав шонкинита, представленный в работе (Владыкин и др., 2014, обр. 308/20). На рис. 11 продемонстрирована модель фракционной кристаллизации щелочно-базитовой магмы (шонкинит) с

образованием нефелинового сиенита при доле закристаллизованного вещества (1-F) от 0.1 до 0.6. Проведенный расчет показал достаточно хорошую сходимость графиков РЗЭ наименее дифференцированных (содержащих меньше SiO₂, щелочей, РЗЭ и HFSE) нефелиновых сиенитов, при доле закристаллизованного вещества 0.2-0.3. При этом результирующий спектр лишь частично сходится с полем составов щелочных сиенитов, а поле кварцевых сиенитов лежит ниже состава шонкинита. Это говорит о том, что образование последних двух групп пород вряд ли укладывается в рамки простого процесса фракционной кристаллизации.

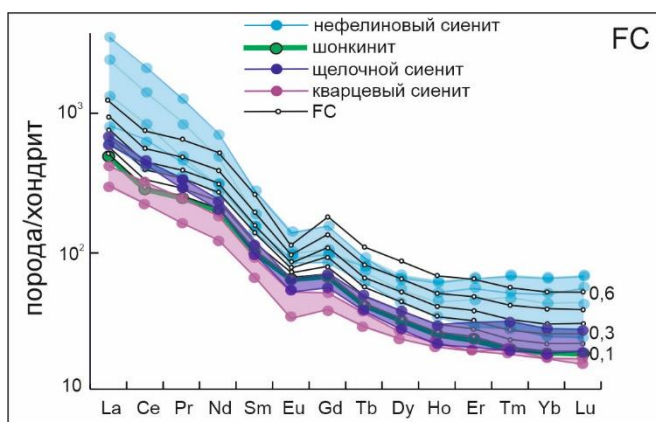


Рис. 11. Диаграмма расчета фракционной кристаллизации (FC, Ersoy and Helvacı, 2010) для пород массива Бурпала. Цифрами обозначено количество закристаллизованного материала в системе. Спектры нормированы на хондрит (Sun and McDonough, 1989). Данные о составе шонкинита взяты из работы (Владыкин и др., 2014).

На рис. 12 приведена модель фракционной кристаллизации – ассимиляции, где в качестве ассимилянта использовались состав гранито-гнейсов позднебайкальского комплекса (т.к. массив Бурпала локализован в данной структуре согласно Андреев и др., 2022, рис. 1) и состав вмещающего песчаника холоднинской свиты. При моделировании процесса FCA с ассимилирующими гранито-гнейсами (рис. 12 а) отмечается слабая сходимость с составом кварцевых сиенитов в области легких редкоземельных элементов при (1-F)=0.35, при этом отношение ассимилированного материала

к закристаллизованному материалу (r), при котором наблюдается данная сходимость слишком высокое – не менее 0.6. В случае, когда ассимилянтом выступают вмещающие песчаники (рис. 12 б), результирующий состав демонстрирует относительно хорошую сходимость с полем составов кварцевых сиенитов при $(1-F)$ от 0.35 до 0.45 и отношении ассимилированного материала к закристаллизованному материалу (r), от 0.4 до 0.5.

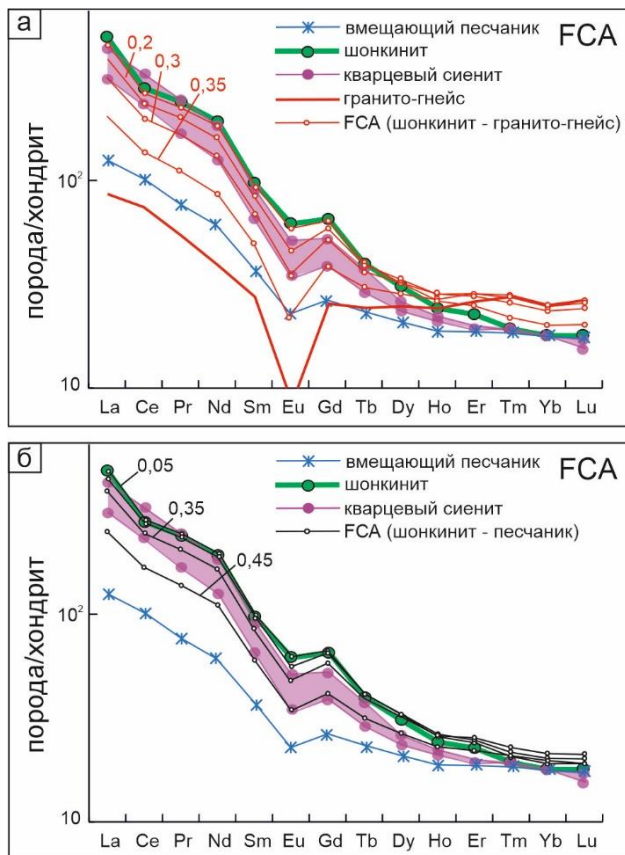


Рис. 12. Диаграммы расчетов фракционной кристаллизации – ассимиляции (FCA, Ersoy and Helvacı, 2010) для пород массива Бурпала. (а) Ассимилянт – позднебайкальские гранито-гнейсы; (б) ассимилянт – вмещающие песчаники холоднинской свиты. Цифрами обозначено количество закристаллизованного

материала в системе. Спектры нормированы на хондрит (Sun and McDonough, 1989). Данные о составе шонкинита взяты из работы (Владыкин и др., 2014).

Полученные изотопные соотношения Sr и Nd в породах массива Бурпала не проявляют явных признаков ассимиляции вещества континентальной коры, поскольку демонстрируют ограниченную вариацию и не обнаруживают устойчивой зависимости относительно других петрохимических и геохимических параметров для различных фаз внедрения. При этом изотопные характеристики Pb в породах массива Бурпала более очевидно отражают процесс вещественного взаимодействия между мантийными щелочными расплавами и вмещающими породами (рис. 5 б). Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$) в различных типах сиенитов массива также демонстрирует существенные различия (рис. 13): минералы щелочных (безнефелиновых) и кварцевых сиенитов обладают значительно более тяжелым изотопным составом кислорода по сравнению с минералами из нефелиновых сиенитов.

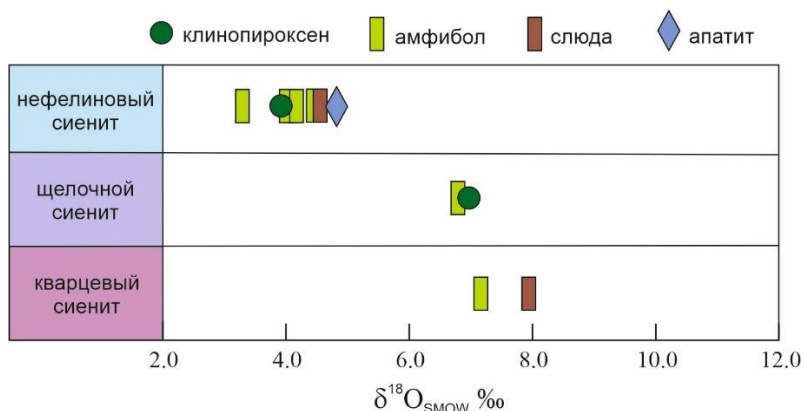


Рис. 13. Изотопный состав кислорода в минералах основных разновидностей пород массива Бурпала.

В отдельно взятых минералах наблюдаются различия в распределении редких и редкоземельных элементов. Минералы нефелиновых сиенитов демонстрируют более высокие содержания Zr, Ti, Sr, Rb и PЗЭ, что может быть следствием формирования нефелиновых сиенитов как наиболее поздних по отношению к щелочным и кварцевым сиенитам. Специфический состав

темноцветов может быть результатом влияния кристаллохимического фактора, поскольку нефелиновые сиениты наиболее обогащены щелочами, а РЗЭ преимущественно концентрируются в обогащенных Na клинопироксенах и амфиболах (Wood and Blundy, 1997, Blundy et al., 1998; Marks et al., 2004). Однако из сравнения составов крайних членов щелочных амфиболов и клинопироксенов в безнефелиновых и нефелинсодержащих (включая нефелин-нормативные) сиенитах следует, что микроэлементы, сопутствующие орудению, концентрируются в породах второй группы. В то же время, составы темноцветных минералов кварцевых сиенитов заметно отличаются от таковых для щелочных и нефелиновых разностей. На графиках макросоставов минералы демонстрируют обогащение магнием, кальцием (для клинопироксена и амфибола), обеднение окисным железом (для клинопироксена), а содержания РЗЭ, Zr, Ti, Sr заметно ниже, чем в минералах щелочных и нефелиновых сиенитов. Такой контраст в химизме минералов может свидетельствовать о том, что формирование перечисленных групп пород вряд ли происходило в рамках единого простого процесса фракционной кристаллизации.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что формированию щелочных кварцевых (кварц-нормативных) сиенитов сопутствовали процессы коровой контаминации с участием пород с высоким содержанием кремния. Одним из наиболее вероятных сценариев образования массива, сочетающего в себе нефелин-нормативные и кварц-нормативные породы, представляется механизм корового анатексиса. В данном исследовании предполагается модель, согласно которой подплавление коры могло происходить в зоне кровли над магматическим очагом, представлявшим собой частично расслоенную магматическую камеру (от щелочно-базитового или базанитового состава до щелочно-сиенитового). Смещение первичного состава расплава в область ультращелочных и недосыщенных кремнеземом расплавов частично могло быть связано с «эффектом плагиоклаза», отсадка которого сопровождается интенсивным потреблением алюминия из расплава при минимальном вовлечении натрия и калия. Этот механизм подтверждается отрицательной европиевой аномалией в спектрах распределения редкоземельных элементов нефелиновых сиенитов, что согласуется с фракционированием плагиоклаза в ходе магматической дифференциации. В результате смешения с образовавшимся коровым расплавом в зоне кровли

формировалась пересыщенная кремнеземом магма, внедрение которой сопровождалось кристаллизацией на поверхности самых внешних обнаженных кварцевых сиенитов (рис. 14). Последовательное пульсационное внедрение кремний-недосыщенных магм из камеры привело к формированию щелочных и нефелиновых сиенитов, незначительно или не загрязненных коровым веществом.

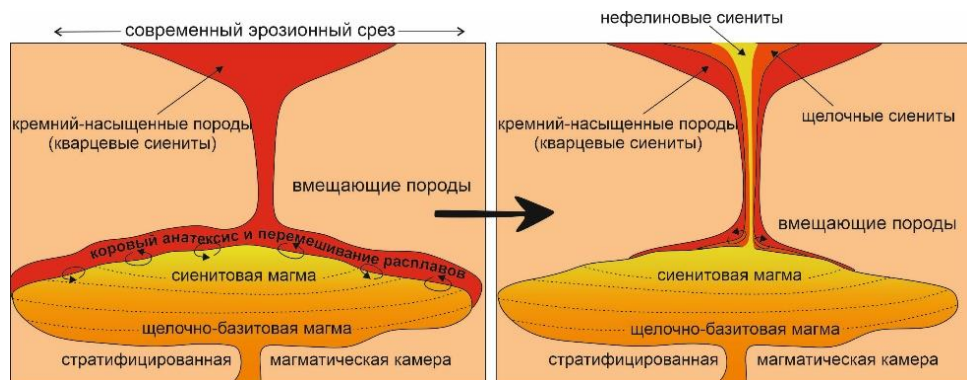


Рис. 14. Схематическая иллюстрация модели становления основных фаз массива Бурпала.

Третье защищаемое положение: *Источником вещества для первичных расплавов, продуцирующих породы массива Бурпала, была изотопно-обогащенная метасоматизированная литосферная мантия.*

Несмотря на то, что первые порции магмы, вероятно, были загрязнены коровым веществом, все группы пород демонстрируют близкие Sr-Nd изотопные характеристики, а конфигурация геохимических спектров подтверждает сингенетичность магм. Повышенные концентрации Pb, а также других высоконесовместимых элементов литофильной группы в нефелиновых сиенитах поздних фаз внедрения, вероятно, связано с метасоматическим обогащением материнских мантийных расплавов. Sr-Nd-Pb изотопные характеристики пород массива Бурпала, а также особенности их редкоэлементного состава свидетельствуют об их генетической связи с древним источником метасоматизированной литосферной мантии.

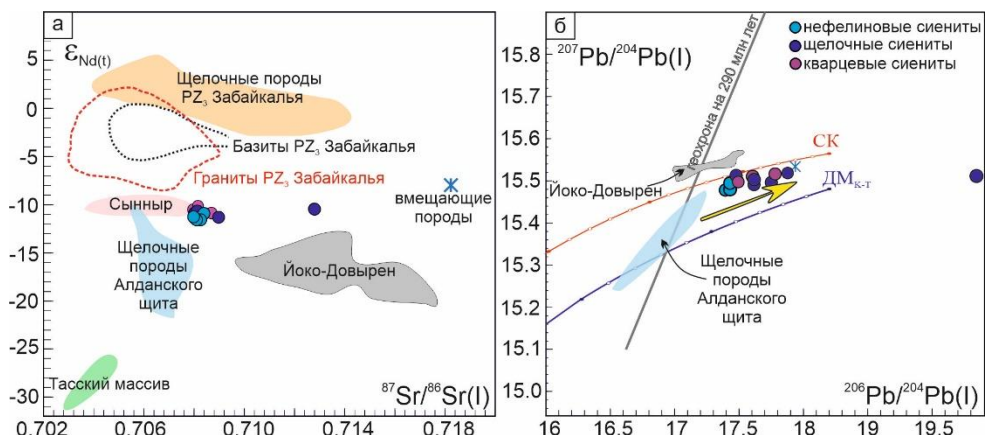


Рис. 15. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{I})$ изотопные отношения (а) и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(\text{I})$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(\text{I})$ диаграмма (б) для пород массива Бурпала. Данные для позднепалеозойских щелочных пород Забайкалья по (Doroshkevich et al., 2012; Izbrodin et al., 2020), позднепалеозойских гранитоидов и базитов Забайкалья по (Jahn et al., 2009; Litvinovsky et al., 2011; Цыганков и др., 2017, 2019), мезозойских щелочных пород Алдан-Станового щита (Bogatikov et al., 1994; Mitchell et al., 1994; Davies et al., 2006; Васюкова и др., 2020; Doroshkevich et al., 2020), расслоенной ультрабазит-базитовой интрузии Йоко-Довырен, пересчитанные на 290 млн лет (Арискин и др., 2015), массива Сынный (Саватенков и др., 2019, наши неопубликованные данные), Тасского массива (Рыцк, 2017). СК – эволюция Pb в Сибирском кратоне, согласно (Ларин и др., 2021); ДМК-Т – эволюция Pb в деплетированной мантии, согласно (Kramers and Tolstikhin, 1997). Желтая стрелка – тренд ассимиляции.

На диаграмме $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (рис. 15 а) значения для пород массива Бурпала схожи с таковыми для щелочных пород массива Сынный, а также близки к полям значений мезозойских щелочных пород Алдан-Станового щита и пород Йоко-Довыренского ультрамафит-мафитового массива, демонстрируя резко отрицательные значения $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$. Перечисленные комплексы, согласно многочисленным исследованиям (Bogatikov et al., 1994; Mitchell et al., 1994; Davies et al., 2006; Арискин и др., 2015; Васюкова и др., 2020; Doroshkevich et al., 2020), имеют «метки» изотопно-обогащенного метасоматизированного мантийного источника, обогащение которого относительно деплетированной мантии происходило в архее-палеопротерозое и древний возраст этого источника играет ключевую роль в наблюдаемых Nd-

изотопных характеристиках. Кроме того, изотопный состав палеопротерозойских мафических пород южной окраины Сибирского кратона (Шаражалгайский блок) и карбонатитов (Алдано-Становой щит) также указывает на наличие изотопно-обогащенных доменов в данном регионе (например, Гонгальский и др., 2008; Doroshkevich et al., 2018; Пономарев и др., 2020; Туркина и Изох, 2023). Подтверждением этого служат данные по Тасскому массиву, который также входит в состав Северо-Байкальской щелочной провинции и имеет схожие возрастные характеристики с массивами Бурпала и Сынныр. Однако породы Тасского массива демонстрируют ультраотрицательные значения $\epsilon\text{Nd}(T)$, больше приближенные к значениям для лампроитов Алдано-Станового щита. Объясняется это тем, что массив также расположен на литосфере Алдано-Станового щита. Различия в изотопных характеристиках Sr, Nd и Pb щелочных пород юга Сибирского кратона, вероятно, отражают неоднородность геохимических условий метасоматоза литосферной мантии, служившей источником для этих магм. Так, например, на диаграмме $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 15 б) мезозойские лампроиты Алдано-Станового щита демонстрируют менее радиогенный изотопный состав Pb по сравнению с породами массивов Бурпала и Йоко-Довырен, расположенных на стыке западного сегмента Байкало-Витимского пояса и краевой зоны Сибирского кратона. Так можно полагать, что метасоматически обогащённый мантийный источник для лампроитов Алдано-Станового щита, вероятно, характеризовался пониженным отношением U/Pb на момент формирования. В то же время, источники для пород массивов Бурпала и Йоко-Довырен, судя по изотопным данным, имели повышенное отношение U/Pb.

Стоит отметить также, что вклад мантийного изотопно-деплетированного компонента в образовании массивов Бурпала и Сынныр, вероятно, оставался незначительным, несмотря на активный позднепалеозойский магматизм плюмового типа в Забайкальском сегменте ЦАСП. В этот период широко проявилось формирование базитов, монцонит-гранитных серий и щелочных комплексов (Jahn et al., 2009; Litvinovsky et al., 2011; Doroshkevich et al., 2012; Цыганков и др., 2017, 2019; Izbrodin et al., 2020), однако породы демонстрируют более высокие значения $\epsilon\text{Nd}(T)$. Это, в свою очередь, свидетельствует о большем вкладе изотопно-деплетированного вещества при генерации их родоначальных расплавов, даже с учётом гетерогенности литосферы Забайкальского сегмента ЦАСП, которая включает

раннедокембрийские кристаллические блоки и более молодые террейны островных дуг, существенно отличающиеся по составу от литосферной мантии южной окраины Сибирского кратона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных, а также анализа опубликованных научных работ и геологических наблюдений можно сформулировать основные выводы об особенностях петрогенезиса щелочного массива Бурпала:

1. Временные рамки формирования основных фаз массива составляют 300-289 млн лет, что сопоставимо по возрасту со становлением ультракалиевого массива Сынныр (289.5 ± 3.2 млн лет), с этапом проявления щелочного магматизма Витимской провинции (ийолит-уртитовые и щелочно-сиенитовые ассоциации пород), а также целого ряда гранитоидных комплексов Ангара-Витимского батолита и ассоциирующих с ними базитов. Полученные геохронологические данные могут свидетельствовать в пользу того, что становление массива происходило в достаточно длительный интервал, и возможно, носило импульсный характер.

2. Отсутствие выраженных признаков единого тренда дифференциации между разновидностями сиенитов, Rb-O изотопные характеристики пород, а также различия по содержаниям редкоземельных и редких элементов в породах и отдельных минералах свидетельствуют о несостоятельности гипотезы единого тренда дифференциации первичной магмы с образованием нефелиновых, щелочных и кварцевых сиенитов, высказанной ранее Н.В. Владыкиными (Владыкин и др., 2014). Наиболее вероятным фактором, объединившим в составе массива Бурпала когенетичные нефелиновые (нефелин-нормативные) и щелочные кварцевые (кварц-нормативные) сиениты, выступают процессы коровой контаминации сиалическим веществом. Становление массива объясняется моделью корового анатексиса, предполагающей открытую систему, сочетающую процессы фракционной кристаллизации первичного расплава и ассимиляции корового материала. В результате смешения с образовавшимся в кровле магматической камеры коровым расплавом формировалась пересыщенная кремнеземом магма, внедрение которой сопровождалось кристаллизацией на поверхности самых внешних обнаженных кварцевых сиенитов.

Последовательное пульсационное внедрение кремний-недосыщенных магм из камеры привело к формированию щелочных и нефелиновых сиенитов, незначительно или не контаминированных коровым веществом.

3. Все разновидности сиенитов массива Бурпала демонстрируют близкие Sr-Nd изотопные характеристики, а конфигурация геохимических спектров подтверждает сингенетичность магм. Породы массива Бурпала обогащены Ba, LILE, Th, легкими лантаноидами и имеют мультиэлементные спектры с резкими минимумами Nb-Ta, Ti и максимумами Ba, Pb. Такие изотопно-геохимические характеристики свидетельствуют о том, что породы массива представляют собой продукты магм, образованных из метасоматизированной литосферной мантии. Эти особенности, наряду с низкими значениями $\epsilon\text{Nd(T)}$ в изученных породах, свидетельствуют о том, что их обогащенный источник сформировался в результате мантийного метасоматоза в ходе аккреционных процессов при становлении континентальной литосферы Сибирского кратона в архей-раннепротерозойский период. При этом роль плюмового компонента в образовании пород массивов Бурпала и Сынныр, вероятно, не была сколь угодно значимой, несмотря на активный позднепалеозойский магматизм плюмового типа в Забайкальском сегменте Центрально-Азиатского складчатого пояса.

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Избродин И.А., Дорошкевич А.Г., **Малютина А.В.**, Семенова Д.В., Радомская Т.А., Крук М.Н., Прокопьев И.Р., Старикова А.Е., Рампилов М.О. Геохронология пород щелочного массива Бурпала (Северное Прибайкалье): Новые U-Pb данные // Геодинамика и тектонофизика. – 2024. – Т.15. – №1. – С. 0741. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0741>

2. **Малютина А.В.**, Дорошкевич А.Г., Старикова А.Е., Избродин И.А., Прокопьев И.Р., Радомская Т.А., Крук М.Н. Особенности состава темноцветных породообразующих минералов в породах щелочного массива Бурпала (Северное Прибайкалье) // Геология и геофизика. – 2025. – № 3. – С. 326-344. <https://doi.org/10.15372/GiG2024161>

3. Дорошкевич А.Г., Саватенков В.М., **Малютина А.В.**, Избродин И.А., Прокопьев И.Р., Старикова А.Е., Радомская Т.А. Петрогенезис и источники вещества пород щелочного редкометального массива Бурпала,

Северное Прибайкалье // Петрология. – 2025. – Т. 33. – № 1. – С. 44–66.
<https://doi.org/10.31857/S0869590325010035>

4. Старикова А.Е., **Малютина А.В.**, Избродин И.А., Дорошкевич А.Г., Радомская Т.А., Исакова А.Т., Семенова Д.В., Корсаков А.В. Минералогическая и геохимическая характеристика циркона как отражение условий его образования на примере цирконов из пород Бурпалинского массива, Северное Прибайкалье // Геодинамика и тектонофизика. – 2024. – Т. 15. – № 5. – С. 0787. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-5-0787>

5. Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Starikova A.E., **Malyutina A.V.**, Moroz T.N., Sharygin I.S. Zr-Th-REE Mineralization Associated with Albite–Aegirine-Bearing Rocks of the Burpala Alkaline Intrusion (North Baikal Region, South Margin of the Siberian Craton) // Minerals. – 2025. – 15. – 742. <https://doi.org/10.3390/min15070742>

Материалы докладов на конференциях:

1. **Малютина А.В.**, Дорошкевич А.Г., Избродин И.А., Старикова А.Е., Крук М.Н. Особенности состава порообразующих минералов щелочного редкометального массива Бурпала (Северное Прибайкалье) // Геодинамика и минерагения Северной Евразии: материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 13-17 марта 2023 г., ГИН СО РАН, Улан-Удэ. С. 349-352.

2. **Малютина А.В.**, Дорошкевич А.Г., Избродин И.А., Старикова А.Е., Крук М.Н. Особенности состава порообразующих минералов щелочного редкометального массива Бурпала (Северное Прибайкалье) // Щелочной и кимберлитовый магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов и алмазов: сборник статей, 11-15 сентября 2023 г., Научная конференция, КНЦ РАН, Апатиты. С. 260-264.

3. **Малютина А.В.**, Дорошкевич А.Г., Старикова А.Е., Избродин И.А., Саватенков В.М. Петрогенезис и источники вещества пород щелочного редкометального массива Бурпала (Северное Прибайкалье) // Глубинный магматизм, его источники и плюмы: материалы XVII Всероссийской конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук и 80-летию со дня рождения Н.В. Владыкина, 20-23 мая 2024 г. ИГХ СО РАН, Иркутск. С. 91-93.