

УДК 552.33(470.21)

## ПЕТРОГЕНЕЗИС И ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА ПОРОД ЩЕЛОЧНОГО РЕДКОМЕТАЛЬНОГО МАССИВА БУРПАЛА, СЕВЕРНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ

© 2025 г. А. Г. Дорошкевич<sup>1, 2, 3, \*</sup>, В. М. Саватенков<sup>4</sup>, А. В. Малютина<sup>1, 2</sup>,  
И. А. Избродин<sup>1, 2</sup>, И. Р. Прокопьев<sup>1, 2</sup>, А. Е. Старикова<sup>1, 2</sup>, Т. А. Радомская<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт им Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>4</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

\*e-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 21.04.2024 г.

После доработки 12.07.2024 г.

Принята к публикации 17.08.2024 г.

Представлены результаты петролого-геохимического исследования пород щелочного массива Бурпала, сложенного кварцевыми сиенитами, щелочными безнефелиновыми и нефелиновыми сиенитами, в том числе рудоносными, входящего в состав позднепалеозойской Северо-Байкальской щелочной провинции. Изученные породы по химическому составу относятся к фойд-монцосиенитам, фойд-сиенитам и сиенитам, варьируют от агпаитовых до миаскитовых разностей. Близкие Sr-Nd изотопные характеристики и конфигурация геохимических спектров подтверждают сингенетичность магм, из которых кристаллизовались нефелиновые, щелочные и кварцевые сиениты. Отрицательная Eu-аномалия в спектрах РЗЭ и достаточно низкая магнезиальность пород свидетельствуют в пользу длительного процесса кристаллизации пород из расплава щелочно-базитового состава. Sr-Nd-Pb изотопные и геохимические характеристики пород массива Бурпала отражают преобладание вещества метасоматизированной литосферной мантии в источнике. Формирование пород массива, согласно особенностям редкоэлементного состава и изотопным данным, было осложнено ассимиляцией верхнекорового материала, что явилось наиболее вероятным фактором, определившим генетическую связь нефелиновых и кварцевых сиенитов в составе массива.

**Ключевые слова:** петрогенезис, кварцевые, щелочные и нефелиновые сиениты, источник вещества, массив Бурпала, Северное Прибайкалье

**DOI:** 10.31857/S0869590325010035 **EDN:** VDWYRY

### ВВЕДЕНИЕ

Щелочные магматические комплексы обычно встречаются в складчатых и внутриплитных областях и предоставляют важную информацию о посторогенных или внутриплитных процессах растяжения в пределах континентальной литосферы и эволюции последней. Кроме того, щелочные породы, как правило, характеризуются обогащением крупноионными литофильными, высокозарядными и редкоземельными элементами, образуя месторождения и рудопроявления. В связи с высокой научной и практической значимостью щелочных комплексов проводятся многочисленные исследования, посвященные их петрогенезису

и рудоносности. Известно, что генерация щелочных магм происходит при частичном плавлении метасоматизированной литосферной мантии, а нефелиновые и щелочные сиениты в щелочных комплексах формируются в результате длительного процесса фракционной кристаллизации щелочно-базитовых или нефелинитовых расплавов (например, Kramm, Kogarko, 1994; Arzamastsev et al., 2001; Riishuus et al., 2008; Marks et al., 2011; Когарко, 2019). Характерной чертой, общей для многих щелочных магматических комплексов мира и малоизученной, является тесная пространственная ассоциация кремний-недосыщенных и кремний-пересыщенных щелочных пород. Во многих

случаях петролого-геохимические исследования указывают на их общий источник и когенетическое происхождение (например, Foland et al., 1993; Riishuus et al., 2008; Estrade et al., 2014), несмотря на то, что образование когенетичных кварцевых и нефелиновых сиенитов является проблематичным из-за наличия термального барьера ( $Ab-Or$ ) между ними в системе ( $Ne-Kfs-Qz-H_2O$ ). Было предложено несколько возможных механизмов для объяснения этого, которые включают: (1) процесс, устраняющий термальный барьер с участием летучих; (2) увеличение давления воды в процессе кристаллизации; (3) открытая система (Kogarko, 1974; Pankhurst et al., 1976; Foland et al., 1993; Riishuus et al., 2008 и др.). В последнее время все большую поддержку получает модель процесса в открытой системе, где образование нефелиновых сиенитов может быть связано с ассимиляцией осадочных карбонатов либо кварцевых сиенитов – с контаминацией породами, насыщенными кремнеземом (например, Foland et al., 1993; Riishuus et al., 2008; Doroshkevich et al., 2012; Estrade et al., 2014; Izbrodin et al., 2020; Vorontsov et al., 2021).

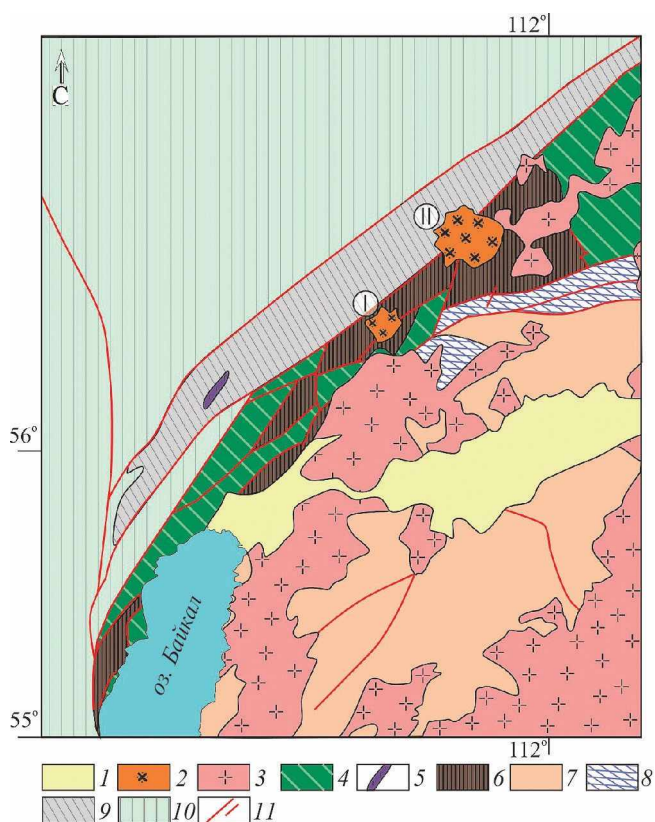
Щелочной массив Бурпала, сложенный кварцевыми сиенитами, щелочными безнефелиновыми и нефелиновыми сиенитами, расположен в Северном Прибайкалье и, наряду с Сыннырским, Тасским и другими массивами, входит в состав позднепалеозойской Северо-Байкальской щелочной провинции. Их формирование синхронно с проявлением позднепалеозойского посторогенного щелочного, базитового и гранитоидного магматизма, инициированного плюмовой активностью, в пределах Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса (Jahn et al., 2009; Litvinovsky et al., 2011; Цыганков и др., 2017, 2019; Doroshkevich et al., 2012; Izbrodin et al., 2020). Поскольку массив Бурпала является уникальным редкометальным щелочным объектом, в котором известно около 80 минеральных видов, в том числе новых и редчайших, то его минералогическому исследованию посвящено множество работ таких исследователей, как А.М. Портнов, А.Я. Жидков, Г.В. Андреев, Е.И. Семенов, А.П. Хомяков, А.А. Ганзеев, С. Мерлино, А.Р. Шахмурадян, И.А. Сотникова и другие. Петрологические аспекты становления массива освещены в работах (Владыкин и др., 2014; Vladykin, Sotnikova, 2017), согласно которым образование исходного расплава происходило из обогащенного мантийного источника ЕМII-типа, с последующей магматической дифференциацией первичного расплава, сопровождавшейся образованием всех разновидностей пород массива.

В настоящей работе представлены результаты петролого-геохимических, включая изотопные (Sr, Nd, Pb, O), исследований основных разновидностей пород массива Бурпала, обсуждаются характеристика источника вещества и механизм

возможности сосуществования нефелиновых и кварцевых сиенитов.

## КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАССИВА

Массив Бурпала, как отмечалось выше, 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



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

1 – четвертичные впадины Байкальской рифтовой системы; 2, 3 – магматические комплексы позднего палеозоя: 2 – щелочные (I – Бурпала, II – Сынныр), 3 – монзонит-граносиенит-гранитоидные; 4 – позднебайкальские структуры Байкало-Витимского пояса; 5 – ультрабазиты Йоко-Довыренского массива; 6 – раннебайкальские блоки метаморфических комплексов; 7 – Баргузино-Витимский супертеррейн (ЦАСП); 8 – раннебайкальский Анамакит-Муйский террейн; 9 – раннебайкальские структуры Байкало-Патомского пояса: Олоkitская рифтогенная зона; 10 – Маректинский и Байкало-Тонодский выступы фундамента Сибирского кратона; 11 – тектонические швы и границы.

выступом фундамента и неопротерозойскими рифтогенными структурами Олоkitской зоны. В западном сегменте Байкало-Витимского комплекса совмещены раннебайкальские глубокометаморфизованные 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 прорывает терригенно-осадочные породы холоднинской свиты и занимает на поверхности площадь около 250 км<sup>2</sup> (рис. 2). Вмещающие породы на контакте с массивом превращены в кварц-биотит-кордиеритовые роговики и интенсивно метасоматизированы (альбит-нефелин-эгириновые метасоматиты). Мощность зоны фенитизации достигает 250–300 м (Пак и др., 1962; Портнов, Нечаева, 1967). Массив сложен кварцевыми сиенитами, щелочными безнефелиновыми и нефелиновыми сиенитами, пуласкитами. Дайки пегматитов, гранит-аплитов, щелочных гранитов и сиенитов прорывают как породы массива, так и вмещающие образования. Среди жильных образований также отмечены эвдиалит-содалитовые сиениты и апатит-флюоритовые породы, расположенные в центральной части массива (Сотникова и др., 2011; Владыкин и др., 2014). Редкометальные пегматиты и апатит-флюоритовые породы авторы

относили к крайним продуктам магматической дифференциации.

Кварцевые сиениты расположены в краевой части массива и образуют кайму шириной до 2 км. Щелочные безнефелиновые сиениты занимают 60–70% от общего объема породы массива. Между кварцевыми и щелочными сиенитами отмечаются постепенные взаимопереходы (Андреев, 1981). Нефелиновые сиениты и пуласкиты образуют линзовидные тела среди щелочных сиенитов, размером до 2 км<sup>2</sup>. Контакты между щелочными безнефелиновыми и нефелиновыми сиенитами в различных частях массива различаются от расплывчатых до резких (Пак и др., 1962; Портнов, 1965). Г.В. Андреев (Андреев, 1981) утверждает, что фельдшпатовидные сиениты характеризуются только секущими контактами с сиенитами. Редкометальная минерализация массива связана с этапом формирования нефелиновых и щелочных сиенитов, в том числе, их пегматоидных разновидностей, а также с процессами фенитизации (в зонах экзоконтакта) и формированием эгирин-альбитовых метасоматитов с брито-литом, бурпалитом, лопаритом, катаплеитом и другими аксессуарными минералами (Пак и др., 1962; Портнов, 1965). Стоит отметить, что редкометальная минерализация в нефелиновых и щелочных сиенитах распределена неравномерно, некоторые участки, где редкометальные минералы образуют шлировые и лизновидные обособления, имеют

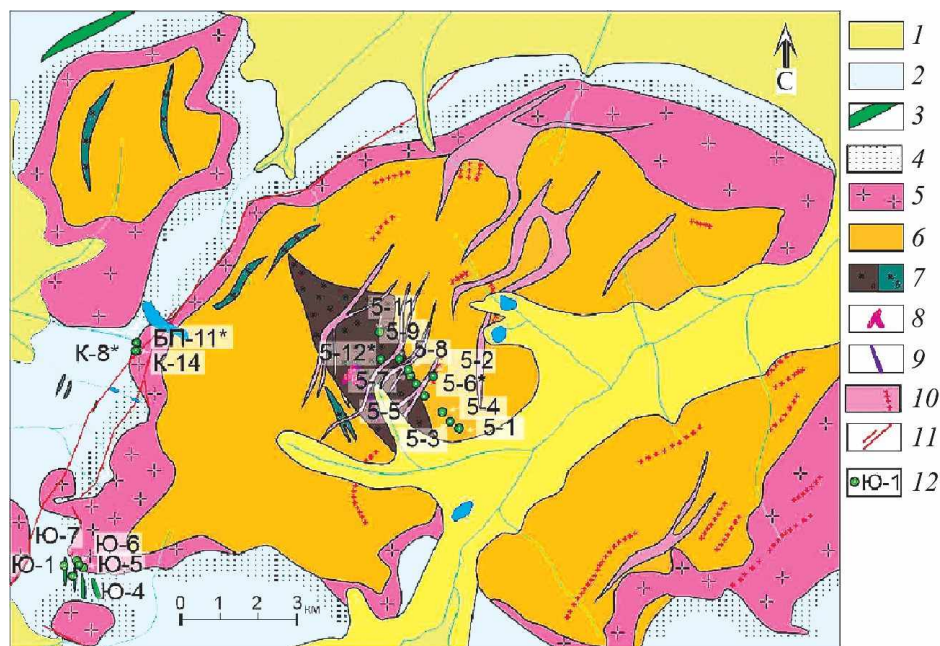


Рис. 2. Схема геологического строения массива Бурпала, по (Пак и др., 1962) с изменениями.

1 – четвертичные отложения; 2 – песчаники и алевролиты холоднинской свиты; 3 – диориты, габбро-диориты, габбро; 4 – роговики, фениты; 5 – кварцевые сиениты; 6 – щелочные сиениты; 7 – нефелиновые сиениты и пуласкиты (а), жильные нефелиновые сиениты (б); 8 – пегматиты; 9 – апатит-флюоритовые породы; 10 – щелочные граниты и гранит-аплиты; 11 – разрывные нарушения; 12 – точки отбора проб, звездочкой указаны точки, в которых отобрано по несколько разновидностей (вне масштаба).



мощность до 1 м, реже 3–5 м, и протяженность первые десятки метров (Пак и др., 1962).

Н.В. Владыкин с соавторами (Владыкин и др., 2014) дали информацию о наличии в западном обрамлении массива (во вмещающих породах) даек шонкинитов. По их мнению, они имеют мощность 1–5 м и протяженность до 100 м, сложены КПШ, клинопироксеном, биотитом, гранатом и кальцитом и, вероятно, являются наиболее ранней фазой.

Тела долеритов и габбро-долеритов располагаются в южной части массива, в пределах осадочно-терригенных вмещающих пород, в виде даек и силлов. Породы интенсивно хлоритизированы и эпидотизированы. Согласно (Избродин и др., 2024), они являются разновозрастными (607 и 294 млн лет). Имеющиеся геохронологические данные по породам массива свидетельствуют об импульсном характере их становления. Так, U-Pb возраст щелочных сиенитов и рудоносных пегматитов Бурпалы равен  $294 \pm 1$  и  $283 \pm 8$  млн лет соответственно (Котов и др., 2013; Владыкин и др., 2014). Время кристаллизации меланократовых щелочных и нефелиновых сиенитов —  $298 \pm 2$  и  $296 \pm 2$  млн лет, кварцевых и кварцсодержащих сиенитов —  $291 \pm 2$  и  $293 \pm 3$  млн лет, щелочных гранитов —  $293 \pm 3$  млн лет (Избродин и др., 2024).

Согласно (Владыкин и др., 2014), последовательность формирования основных разновидностей пород массива выглядит следующим образом: 1) дайки шонкинитов; 2) нефелиновые сиениты, пуласкиты, кварцевые сиениты; 3) жильная фаза, которая включает в себя нефелиновые и щелочные сиениты, редкометальные пегматиты, апатит-флюоритовые породы и щелочные граниты. А.М. Портнов и Е.А. Нечаева (Портнов, Нечаева, 1967) к первой фазе относили образование массивных щелочных сиенитов, а ко второй — трахитоидных нефелиновых сиенитов, с последующим формированием жильных пород и различных метасоматитов. А.Я. Жидков (1956) связывал зональность массива с единым процессом магматической дифференциации, которая выражается в смене нефелиновых сиенитов кварцевыми разностями.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы, использованные для петрографических и петролого-геохимических исследований, были отобраны коллективом авторов в ходе полевых работ на массиве Бурпала в 2022 г. Петрографическое изучение пород проводилось на микроскопе Olympus BX51 с фотокамерой.

Содержания порообразующих оксидов в породах определены методом РФА на спектрометре ARL 9900XP (Termo Fisher Scientific). Точность определений с нижними границами содержания была равна 0.1–0.00n%. Содержания

микроэлементов в породах были определены методом ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (Finnigan Mat) с ультразвуковым распылителем U-5000AT+. Пределы обнаружения элементов составляли от 0.005 до 0.1 мкг/г, точность анализа — в среднем 2–7 отн. %. Исследования выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск).

Изотопный состав кислорода ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ) в силикатах и фосфатах определялся в Геологическом институте СО РАН (Улан-Удэ) на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 с использованием метода лазерного фторирования (Sharp, 1990). Образцы нагревались 100W CO<sub>2</sub> лазером в атмосфере BrF<sub>5</sub>. В качестве эталонов использовались следующие международные стандарты: кварц NBS-28 (9.65‰; n = 8) и биотит NBS-30 (5.11‰; n = 12). По результатам этих данных и воспроизводимости повторяющихся измерений, погрешность значений  $\delta^{18}\text{O}$  анализируемых минералов не превышала 0.2‰.

Sr-Nd-Pb изотопные исследования в породах и минералах (полевой шпат) проведены в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург). Соотношения изотопов Sr и Nd в породах измерялись на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI (Finnigan MAT, Германия). Около 100 мг порошка породы растворяли в смеси HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> в микроволновой печи с добавлением <sup>149</sup>Sm-<sup>150</sup>Nd и <sup>85</sup>Rb-<sup>84</sup>Sr перед растворением для точного определения соотношений <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd и <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr в образцах. Sr изолировали с помощью смолы Sr-Resin (Eichrom Industries, Иллинойс, США), согласно (Mikova, Denkova, 2007). Rb отделяли с использованием катионообменной смолы BioRad AG1-X8. Для Nd изотопного анализа РЗЭ сначала отделяли от основных элементов и Ba катионным обменом с использованием смолы RE-Resin (Eichrom Industries, Иллинойс, США), а затем выделяли Nd и Sm в соответствии с (Misawa et al., 2000). Для выделения Nd и Sm использовали смолу Ln-Resin (Eichrom Industries, Иллинойс, США), согласно (Mikova, Denkova, 2007). Холостые образцы Rb и Sr составляли <50 pg и <100 pg соответственно, холостые образцы Sm и Nd составляли <50 pg и <100 pg соответственно и считались незначительными по сравнению с количеством проанализированного образца. Соотношения изотопов Sr и Nd определялись в режиме мультидинамического сбора. Изотопные отношения были нормированы к <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0.1194 и <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.7219 (O’Nions et al., 1977). Измеренные значения для NBS SRM-987 и JNdi-1 составили <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr =  $0.710275 \pm 15$  (2SD, n = 14) и <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd =  $0.512098 \pm 9$  (2SD, n = 18) в период измерения. Измеренные соотношения стандарта BCR-2 (2SD, n = 6) были: <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr =  $0.4062 \pm 37$ , <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr =  $0.705036 \pm 22$ , <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd =  $0.1380 \pm 6$ , <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd =  $0.512642 \pm 14$ .

Для определения изотопного состава Pb использовали либо 100 мг дробленной породы, либо монофракции полевых шпатов (при возможности выделения из породы) с размером зерен 0.5–0.25 мм (подробности см. ниже в табл. 4). Дробленную фракцию пород выщелачивали в 2М HCl при 140°C в течение 2 ч, после этого отмывали в дистиллированной воде и затем истирали в пудру. Фракции полевых шпатов истирали в пудру и подвергали последовательному выщелачиванию сначала в концентрированной HNO<sub>3</sub>, а затем в концентрированной HCl. Между и после кислотной обработки минеральные фракции выполаскивали в дистиллированной воде. Затем истертые фракции валовых проб и полевых шпатов растворяли в смеси HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> в микроволновой печи. <sup>235</sup>U-<sup>207</sup>Pb-<sup>204</sup>Pb добавляли к образцам перед растворением для точного определения соотношения <sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb, а также изотопного состава Pb в образцах, согласно методике двойного изотопного разбавления (Мельников, 2005). Pb выделяли с использованием анионообменной смолы AG1-X8 с последующим выделением U с применением смолы UTEVA-Resin (Eichrom Industries, Иллинойс, США). Химическая процедура аналогична методике (Pfander et al., 2002). Общий уровень загрязнения для Pb и U составил <50 pg и <5 pg соответственно и является незначительным по сравнению с количеством Pb и U в проанализированных образцах. Изотопные данные были получены с использованием многоколлекторного масс-спектрометра Triton TI (Finnigan MAT, Германия). Измеренные соотношения стандарта BCR-2 составили <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 18.7556 ± 0.0061, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 15.6235 ± 0.0057, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 38.728 ± 0.018, <sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb = 0.0766 ± 0.001. 4 (внешняя ошибка: 2SD, n = 6). Средние значения стандарта NBS SRM-982 равны <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 36.7404 ± 0.0024, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 17.1565 ± 0.0016, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 36.7280 ± 0.0048 (внешняя ошибка: 2SD, n = 88).

## ПЕТРОГРАФИЯ

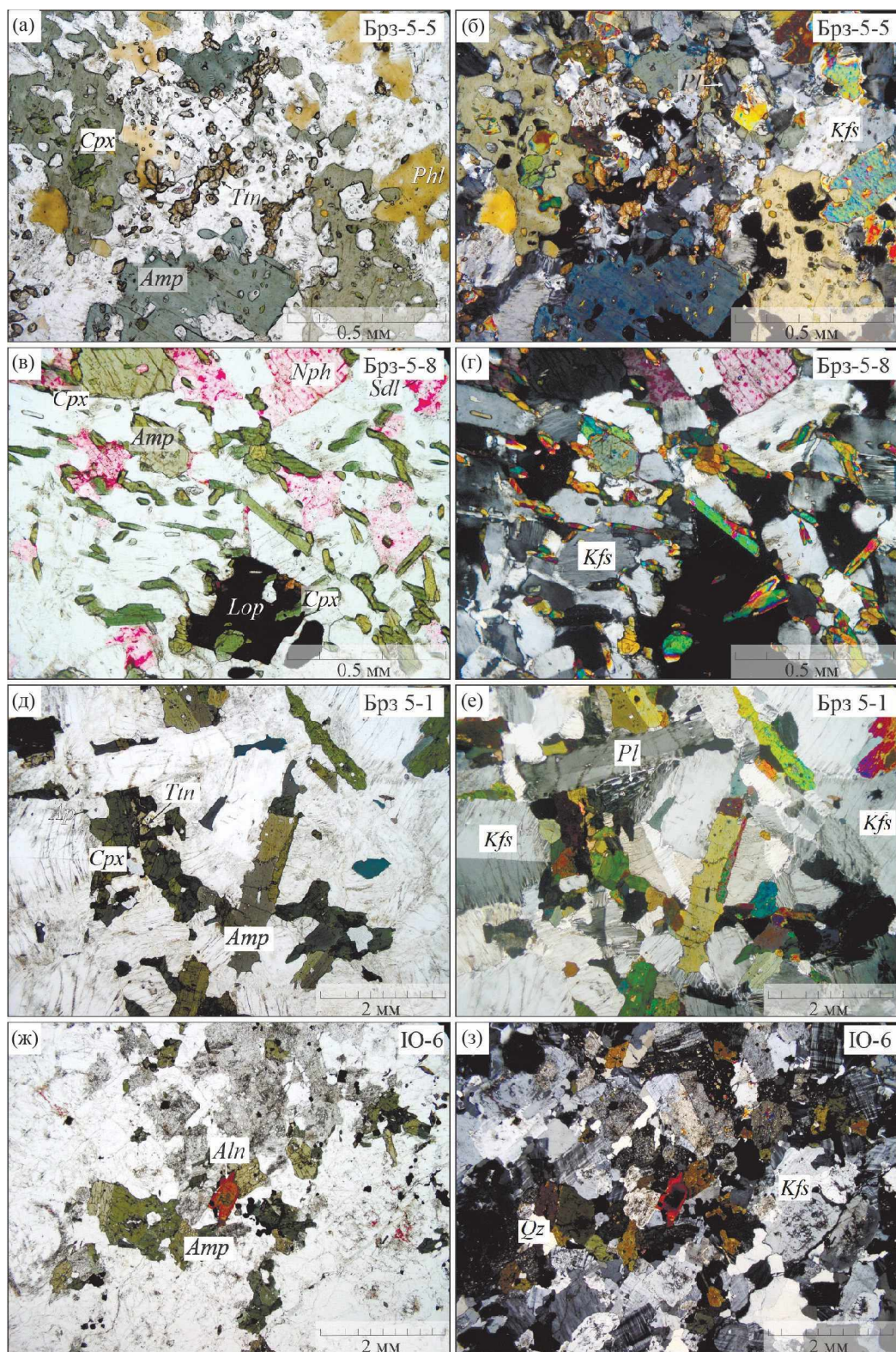
**Нефелиновые сиениты**, в том числе **рудноносные**, представляют собой массивные или трахитоидные мелко-среднезернистые породы, сложенные преимущественно калиевым полевым шпатом (30–40%), клинопироксеном (15–20%), нефелином (~15%) и/или содалитом (10–20%) (рис. 3а–3г). В качестве второстепенных минералов отмечаются биотит (~5%), щелочной амфибол (2–3%) и плагиоклаз (4–5%). Иногда встречается канкринит. Акцессорные минералы – титанит, апатит, лопарит, флюорит, ловенит, катаплеит, циркон, пироксдор, вкрапленные и гнездообразные выделения магнетита. Удлиненные таблитчатые гипидиоморфные кристаллы калиевого полевого шпата ксеноморфны относительно пироксена и иногда вытянуты преимущественно в одном направлении, что

придает породе трахитоидную текстуру. Отмечается двойникование зерен и пертитовая штриховка. Зерна нефелина содержат включения клинопироксена. Слюда в породе встречается в виде таблитчатых чешуек, в качестве включений в минерале присутствуют мелкие зерна клинопироксена. Рудоносные нефелиновые сиениты отличаются тем, что количество акцессорных минералов в них может достигать 3% и более. Темно-коричневые изотропные кристаллы лопарита с квадратным и треугольным сечением (размером от 0.1 до 1 мм) и удлиненные кристаллы катаплеита ассоциируют с флюоритом, титанитом и цирконом. Довольно часто лопарит трансформируется в металопарит. Пироксдор распределен неравномерно, встречается в виде единичных зерен, реже образует небольшие скопления. Размер зерен не превышает 0.2 мм.

В некоторых участках нефелиновые сиениты альбитизированы. Внешне альбитизированные разности отличаются наличием белого сахаровидного альбита. В шлифах появляются коррозионные структуры, обусловленные развитием альбита по ранним минералам. Кроме альбита, по нефелину развиваются минералы группы цеолита. Пироксен практически полностью замещен амфиболом.

**Щелочные сиениты**, в том числе **рудноносные**, представлены как меланократовыми, так и лейкократовыми разностями. Меланократовые щелочные сиениты – это мелко-среднезернистые массивные породы, сложенные преимущественно калиевым полевым шпатом (~60%), клинопироксеном (до 10%) щелочным амфиболом (~15%), плагиоклазом (~9%) и биотитом (~8%). Лейкократовые щелочные сиениты сложены калиевым полевым шпатом (~70%), плагиоклазом (10–15%), клинопироксеном (5–10%), щелочным амфиболом (~5%). Акцессорные минералы – титанит, циркон, апатит, алланит, флюорит, магнетит, ильменит, лопарит, пироксдор, бритоцит ассоциируют с амфиболом и клинопироксеном. Участками редкометалльные минералы образуют скопления и линзовидные обособления, в этих случаях их количество достигает 5% от объема породы; как результат, щелочные сиениты становятся рудоносными. Удлиненно-призматические и таблитчатые кристаллы калиевого полевого шпата образуют взаимные прорастания с темноцветными минералами (рис. 3д–3е). По периферии зерна полевого шпата содержат ламели альбита. Зерна щелочного амфибола содержат большое количество включений клинопироксена, слюды, титанита и апатита, из-за чего имеют ситовидную микроструктуру. В гипидиоморфных удлиненно-призматических и таблитчатых кристаллах слюды встречаются мелкие включения циркона и титанита. Титанит иногда образует агрегатные скопления в породе и оторочки вокруг зерен магнетита.





**Рис. 3.** Микрофотографии шлифов нефелиновых (а–г), щелочных (д–е) и кварцевых (ж–з) сиенитов массива Бурпала в проходящем свете (левая колонка) и скрещенных николях (правая колонка). *Aln* – алланит, *Amp* – амфибол, *Kfs* – калиевый полевой шпат, *Cpx* – клинопироксен, *Lop* – лопарит, *Nph* – нефелин, *Pl* – плагиоклаз, *Phl* – флогопит, *Sdl* – содалит, *Ttn* – титанит, *Qz* – кварц. Розовая окраска фельдшпатоидов вызвана их окрашиванием в растворе алюминона.



Альбитизированные разности щелочных сиенитов представляют собой мелкозернистые породы пепельно-серого цвета пятнисто-прожилкового облика, обусловленного неравномерным развитием агрегатов альбита. Количество минерала в пределах поля шлифа может варьировать от 5 до 80%, типична гранобластовая структура с реликтами первичных минералов.

**Кварцевые сиениты** — среднезернистые массивные породы, сложенные преимущественно калиевым полевым шпатом (~60%), плагиоклазом (~15%) и амфиболом (~15%) (рис. 3ж—3з). В качестве второстепенного минерала отмечается кварц (~5%). Акцессорные минералы представлены титанитом, апатитом, цирконом, алланитом, магнетитом. Таблитчатые гипидиоморфные кристаллы калиевого полевого шпата с микроклиновой решеткой ксеноморфны относительно амфибола и плагиоклаза, но более идиоморфны относительно кварца. В зернах калиевого полевого шпата отмечаются пертиты. Амфибол содержит включения титанита и магнетита. Титанит также обнаруживается в полевом шпате и образует оторочки вокруг магнетита.

**Щелочные граниты** — массивные тонкозернистые породы, сложенные преимущественно альбитом (до 35%), калиевым полевым шпатом (30–35%), кварцем (до 20%). Второстепенными и акцессорными являются щелочной амфибол, клинопироксен, мусковит, апатит, циркон, магнетит, флюорит, рутил, титанит, алланит. Как правило, породы значительно изменены, в этих случаях темноцветные минералы хлоритизированы, полевые шпаты серицитизированы, по магнетиту развивается гематит.

#### ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Составы пород массива Бурпала представлены в табл. 1 и на рис. 4–6. На классификационной диаграмме  $\text{SiO}_2$  vs  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  нефелиновые и нефелинсодержащие сиениты ложатся в область фойд-монцосиенитов и фойд-сиенитов, а щелочные и кварцевые — в область сиенитов (рис. 4а). Нефелиновые и нефелинсодержащие сиениты на диаграмме  $\text{Al} - (\text{Na} + \text{K}) - \text{FSSI}$  (рис. 4б) относятся к кремний-недосыщенному типу пород и пересыщены щелочами, щелочные сиениты также пересыщены щелочами, но в основном относятся к кремний-насыщенным породам (в их нормативном составе всегда присутствует кварц). Кварцевые сиениты ложатся в область кремний-насыщенных метаглиноземистых и плюмазитовых пород (рис. 4б).

В нефелиновых и нефелинсодержащих сиенитах апгаитность варьирует от 1 до 1.4, в щелочных сиенитах — от 0.9 до 1.1, а кварцевых — от 0.7 до

0.9. Значения  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  в нефелиновых и щелочных сиенитах варьируют от 0.7 до 1.3 и от 0.3 до 1.2 соответственно (рис. 5); редко достигая 2.0 и зависят от соотношения главных породообразующих минералов. В кварцевых сиенитах  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.1 - 1.2$  (рис. 5). На диаграммах зависимостей основных компонентов от  $\text{SiO}_2$  не проявлено четко выраженной корреляции (рис. 5). Граниты характеризуются схожими с кварцевыми сиенитами концентрациями  $(\text{Na} + \text{K})$ , Zr, Nb, PЗЭ и более низкими Ti, Fe, Mg и Ca. Область вариации основных компонентов, за исключением  $\text{SiO}_2$ , для нефелиновых сиенитов в основном пересекается с таковой для группы щелочных сиенитов, отличаясь более варьирующими их содержаниями. При этом большинство нефелиновых сиенитов, главным образом рудоносные, так же как и рудоносные щелочные сиениты, характеризуется более высокими Zr, Nb, PЗЭ по сравнению с другими группами пород. В альбитизированных щелочных и нефелиновых сиенитах понижаются концентрации Ti, Fe, PЗЭ, Nb и повышается Al относительно их неизменных разностей.

На графиках конфигурации PЗЭ, нормированных к хондриту, для всех разновидностей пород характерно обогащение легкими лантаноидами относительно тяжелых (рис. 6) со значениями  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ , варьирующими от 14 до 130. Eu-аномалия  $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)$  в щелочных и нефелиновых сиенитах находится в интервале 0.6–0.75. Кварцевые сиениты и граниты демонстрируют более выраженную отрицательную Eu-аномалию (около 0.6). В целом содержание PЗЭ в щелочных и кварцевых сиенитах ниже, чем в нефелиновых сиенитах. Как уже отмечалось выше, в разной степени альбитизированных разностях щелочных и нефелиновых сиенитов концентрации PЗЭ понижаются. Спектры содержаний PЗЭ в гранитах схожи с таковыми в щелочных и кварцевых сиенитах. Графики содержаний редких элементов, нормированные к примитивной мантии, во всех разновидностях пород массива демонстрируют обогащение крупноионными литофильными элементами и PЗЭ по отношению к Nb, Ta и Ti, также отмечается положительная Pb-аномалия относительно соседних элементов. Нефелиновые сиениты (в основном рудоносные) более обогащены Zr-Hf и Nb-Ta по сравнению со щелочными и кварцевыми сиенитами. Хотя в рудоносных щелочных сиенитах (обр. БП-11б) концентрация этих элементов сравнима с таковой в нефелиновых разностях. Конфигурация спектров содержаний редких элементов в гранитах схожа с таковой для других пород массива.

#### ИЗОТОПНЫЙ Sr-Nd-Pb И $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ СОСТАВ

Данные по  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  в минералах основных разновидностей пород массива приведены в табл. 2 и

Таблица 1. Химический состав основных разновидностей пород массива Бурпала

| Компоненты                     | Нефелиновые сиениты |          |         |         |           |           |           |           |          |             |             |
|--------------------------------|---------------------|----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------|-------------|
|                                | Брз 5-7             | Брз 5-12 | Брз 5-5 | Брз 5-8 | Брз 5-66* | Брз 5-6в* | Брз 5-6Г* | Брз 5-6д* | Брз 5-9* | Брз 5-12а** | Брз 5-12б** |
| SiO <sub>2</sub>               | 54.16               | 56.72    | 55.11   | 55.99   | 58.10     | 57.63     | 57.42     | 58.30     | 56.27    | 56.43       | 57.19       |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.44                | 1.14     | 0.75    | 0.92    | 1.37      | 0.77      | 1.12      | 2.24      | 1.41     | 0.35        | 0.27        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.39               | 15.00    | 12.84   | 15.44   | 12.77     | 14.71     | 15.70     | 11.77     | 14.14    | 17.92       | 17.19       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.52                | 7.73     | 6.58    | 8.42    | 11.69     | 7.90      | 7.71      | 10.30     | 6.78     | 6.25        | 6.49        |
| MnO                            | 0.16                | 0.17     | 0.32    | 0.16    | 0.22      | 0.19      | 0.18      | 0.28      | 0.31     | 0.06        | 0.07        |
| MgO                            | 1.52                | 1.43     | 5.62    | 0.94    | 0.23      | 0.28      | 0.31      | 0.11      | 0.16     | 0.58        | 0.35        |
| CaO                            | 4.74                | 3.38     | 5.20    | 3.13    | 1.50      | 2.71      | 1.87      | 1.28      | 4.89     | 2.08        | 1.48        |
| Na <sub>2</sub> O              | 7.05                | 7.11     | 5.37    | 7.22    | 7.20      | 5.43      | 5.77      | 6.53      | 4.04     | 6.59        | 6.35        |
| K <sub>2</sub> O               | 4.65                | 6.22     | 4.98    | 6.47    | 5.31      | 7.05      | 6.79      | 5.47      | 8.17     | 7.27        | 6.94        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.40                | 0.03     | 0.57    | 0.03    | bdl       | 0.24      | 0.05      | bdl       | 0.09     | 0.11        | 0.01        |
| П.п.п.                         | 0.40                | 0.70     | 1.22    | 1.07    | 0.27      | 0.38      | 2.23      | 0.25      | 0.58     | 0.98        | 1.84        |
| SO <sub>3</sub>                | 0.31                | 0.13     | 0.16    | 0.18    | bdl       | bdl       | bdl       | bdl       | bdl      | 0.20        | 0.37        |
| Сумма                          | 98.73               | 99.78    | 98.71   | 99.95   | 98.65     | 97.29     | 99.14     | 96.53     | 96.82    | 98.82       | 98.55       |
| Ti                             | 8264                | 6683     | 4396    | 5074    | 7600      | 4233      | 5944      | 11130     | 2881     | 3415        | 1573        |
| V                              | 95.4                | 83.3     | 80.9    | 86.2    | 28.6      | 66.9      | 65.4      | 43.5      | 6.0      | 60.1        | 41.2        |
| Cr                             | 17.5                | 16.0     | 256.2   | 12.5    | 16.0      | 21.2      | 14.9      | 16.8      | 9.9      | 12.3        | 8.2         |
| Mn                             | 1247                | 1312     | 2506    | 1237    | 2257      | 1513      | 1788      | 2837      | 195      | 707         | 569         |
| Co                             | 12.2                | 8.4      | 22.6    | 5.7     | 4.0       | 6.1       | 6.4       | 4.3       | 1.5      | 5.1         | 6.1         |
| Ni                             | 10.3                | 6.8      | 313.7   | 4.4     | 39.0      | 40.8      | 75.5      | 12.2      | 10.4     | 4.2         | 10.6        |
| Cu                             | 8.3                 | 56.7     | 9.7     | 41.7    | 52.5      | 47.4      | 92.3      | 106.5     | 42.0     | 17.3        | 16.6        |
| Zn                             | 157.2               | 172.9    | 334.0   | 125.8   | 472.2     | 218.2     | 428.1     | 199.6     | 38.5     | 84.8        | 67.3        |
| Rb                             | 177.0               | 302.5    | 324.5   | 340.6   | 249.2     | 499.4     | 683.6     | 607.5     | 333.8    | 326.4       | 413.0       |
| Sr                             | 3121                | 1310     | 1556    | 1224    | 881       | 1663      | 1296      | 1778      | 225      | 1093        | 979         |
| Y                              | 52.6                | 103.4    | 113.6   | 70.3    | 131.9     | 112.0     | 106.1     | 283.7     | 232.0    | 18.1        | 10.2        |
| Zr                             | 581                 | 2237     | 346     | 2413    | 7772      | 9708      | 3426      | 10806     | 4275     | 567         | 710         |
| Nb                             | 40.0                | 80.8     | 36.7    | 81.1    | 391.7     | 333.5     | 201.2     | 815.2     | 138.1    | 17.2        | 3.9         |
| Mo                             | 7.1                 | 3.6      | 0.8     | 1.1     | 0.9       | 1.2       | 1.5       | 1.0       | 1.7      | 2.3         | 1.4         |
| Cs                             | 28.2                | 3.6      | 18.3    | 8.4     | 1.1       | 2.1       | 7.8       | 3.2       | 1.4      | 3.8         | 6.0         |
| Ba                             | 4522                | 1713     | 1937    | 803     | 303       | 1117      | 950       | 664       | 287      | 998         | 693         |
| La                             | 142                 | 193      | 325     | 320     | 1337      | 841       | 571       | 2471      | 577      | 36          | 27          |
| Ce                             | 246                 | 400      | 512     | 521     | 1963      | 1351      | 881       | 3350      | 850      | 85          | 46          |
| Pr                             | 33                  | 43       | 46      | 46      | 166       | 123       | 83        | 278       | 84       | 10          | 4           |
| Nd                             | 122                 | 141      | 141     | 123     | 392       | 341       | 226       | 650       | 229      | 37          | 14          |
| Sm                             | 21.2                | 23.0     | 22.9    | 14.9    | 34.3      | 43        | 29        | 70        | 36       | 6.0         | 1.9         |
| Eu                             | 4.8                 | 5.2      | 5.2     | 3.1     | 6.2       | 8.1       | 5.7       | 13.5      | 7.9      | 1.3         | 0.4         |
| Gd                             | 16.9                | 19.8     | 20.3    | 13.5    | 25.7      | 31.5      | 21.5      | 56.5      | 33       | 4.7         | 1.7         |
| Tb                             | 2.2                 | 2.9      | 3.0     | 1.9     | 2.9       | 3.4       | 2.7       | 6.0       | 5.2      | 0.6         | 0.2         |
| Dy                             | 10.8                | 16.8     | 17.1    | 11.8    | 15.6      | 16.4      | 13.6      | 27.2      | 32       | 2.9         | 1.1         |
| Ho                             | 1.9                 | 3.4      | 3.5     | 2.6     | 3.7       | 2.9       | 2.5       | 5.0       | 7.1      | 0.6         | 0.2         |
| Er                             | 4.7                 | 10.7     | 10.5    | 8.4     | 14.1      | 9.1       | 7.5       | 14.3      | 21       | 1.4         | 0.7         |
| Tm                             | 0.7                 | 1.7      | 1.7     | 1.5     | 2.6       | 1.3       | 1.2       | 2.0       | 2.9      | 0.2         | 0.1         |
| Yb                             | 4.1                 | 11.0     | 11.0    | 10.5    | 19.2      | 8.4       | 7.3       | 12.3      | 17.0     | 1.7         | 1.0         |
| Lu                             | 0.6                 | 1.7      | 1.7     | 1.5     | 3.2       | 1.4       | 1.1       | 1.8       | 2.2      | 0.3         | 0.2         |
| Hf                             | 14.0                | 50.0     | 7.9     | 53.3    | 128.5     | 142       | 63        | 167       | 81       | 17.5        | 23.0        |
| Ta                             | 1.9                 | 3.3      | 1.2     | 2.9     | 10.2      | 6.8       | 4.5       | 12.5      | 6.36     | 1.2         | 0.1         |
| Pb                             | 30.5                | 123.3    | 75.2    | 114     | 165       | 43.8      | 189       | 148       | 61.4     | 25.0        | 2136        |
| Th                             | 15.2                | 32.2     | 49.4    | 60.8    | 172       | 127       | 172       | 596       | 27.4     | 2.0         | 1.8         |
| U                              | 1.3                 | 11.4     | 7.0     | 12.1    | 43.1      | 44.0      | 34.7      | 68.6      | 12.8     | 0.5         | 0.6         |



Таблица 1. Окончание

| Компоненты                     | Щелочные сиениты |        |       |       |         |         |         |            |           | Кварцевые сиениты |       |       | Граниты |         |
|--------------------------------|------------------|--------|-------|-------|---------|---------|---------|------------|-----------|-------------------|-------|-------|---------|---------|
|                                | Брз 5-3          | БЗ 5-1 | БП-11 | К-14  | БП-116* | К-8-2а* | К-8-26* | Брз 5-11** | Брз 5-4** | БП-11а            | Ю-6   | Ю-5   | Ю-7     | Брз 5-2 |
| SiO <sub>2</sub>               | 60.92            | 61.61  | 58.98 | 60.45 | 58.20   | 59.43   | 58.20   | 63.83      | 64.13     | 62.16             | 62.50 | 60.30 | 70.90   | 71.90   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.71             | 0.41   | 0.98  | 0.84  | 0.86    | 0.93    | 0.86    | 0.21       | 0.11      | 0.80              | 0.62  | 0.90  | 0.26    | 0.28    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.84            | 14.90  | 15.08 | 15.47 | 16.20   | 15.35   | 16.20   | 17.46      | 17.62     | 15.48             | 15.91 | 15.29 | 14.63   | 14.24   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.95             | 6.43   | 6.44  | 5.98  | 7.22    | 5.48    | 7.22    | 3.67       | 2.22      | 5.16              | 5.46  | 6.42  | 2.25    | 2.34    |
| MnO                            | 0.15             | 0.12   | 0.12  | 0.09  | 0.39    | 0.15    | 0.39    | 0.06       | 0.03      | 0.09              | 0.09  | 0.12  | 0.03    | 0.02    |
| MgO                            | 0.63             | 0.79   | 1.98  | 1.58  | 2.00    | 1.25    | 2.00    | 0.20       | 0.23      | 1.42              | 1.81  | 2.20  | 0.31    | 0.19    |
| CaO                            | 2.05             | 1.92   | 3.90  | 3.91  | 0.15    | 3.90    | 0.15    | 0.65       | 0.82      | 3.30              | 3.67  | 3.86  | 0.63    | 0.28    |
| Na <sub>2</sub> O              | 6.33             | 6.91   | 5.59  | 4.80  | 8.24    | 3.59    | 8.24    | 6.05       | 6.06      | 4.36              | 4.06  | 3.97  | 3.86    | 4.66    |
| K <sub>2</sub> O               | 6.00             | 5.39   | 5.17  | 5.47  | 2.40    | 7.46    | 2.40    | 7.17       | 7.19      | 5.34              | 4.54  | 4.76  | 5.17    | 4.93    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.05             | 0.02   | 0.51  | 0.38  | 0.11    | 0.21    | 0.11    | 0.04       | 0.05      | 0.36              | 0.28  | 0.44  | 0.07    | 0.04    |
| П.п.п.                         | 0.73             | 0.58   | 0.55  | 0.15  | 0.30    | 1.39    | 0.30    | 0.24       | 0.57      | 0.37              | 0.67  | 1.00  | 1.11    | 0.96    |
| SO <sub>3</sub>                | 0.08             | 0.09   | bdl   | bdl   | bdl     | bdl     | bdl     | 0.07       | 0.10      | bdl               | 0.02  | bdl   | bdl     | bdl     |
| Сумма                          | 99.43            | 99.16  | 99.29 | 99.14 | 96.22   | 99.14   | 96.08   | 99.65      | 99.12     | 98.84             | 99.61 | 99.26 | 99.22   | 99.86   |
| Ti                             | 4317             | 2386   | 5715  | 5000  | 4908    | 4847    | 5167    | 1113       | 580       | 4637              | 3670  | 5411  | 1553    | 1593    |
| V                              | 64.8             | 81.6   | 72.5  | 61.7  | 87      | 60.2    | 63.2    | 25.3       | 9.1       | 57.8              | 62.8  | 78.0  | 12.9    | 13.2    |
| Cr                             | 15.6             | 6.3    | 23.9  | 44.1  | 66      | 21.2    | 23.5    | 6.5        | 13.3      | 28.1              | 36.5  | 33.0  | 21.3    | 15.4    |
| Mn                             | 1188             | 961    | 958   | 721   | 2875    | 1244    | 1271    | 393        | 173       | 694               | 653   | 950   | 232     | 99.8    |
| Co                             | 6.0              | 4.9    | 10.7  | 10.9  | 15.1    | 7.8     | 10.6    | 3.3        | 1.0       | 9.1               | 10.3  | 13.0  | 1.2     | 0.9     |
| Ni                             | 4.9              | 3.0    | 12.2  | 13.3  | 36      | 37.2    | 9.7     | 3.8        | 3.0       | 9.7               | 16.6  | 18.4  | 3.0     | 3.0     |
| Cu                             | 11.0             | 10.7   | 42.2  | 18.5  | 5.5     | 149.2   | 54.3    | 11.3       | 6.5       | 13.6              | 14.4  | 10.0  | 38.1    | 6.2     |
| Zn                             | 110.2            | 96.0   | 160.9 | 78.8  | 529     | 445.8   | 267.0   | 69.2       | 26.2      | 101.6             | 59.5  | 94.5  | 31.1    | 14.2    |
| Rb                             | 257.7            | 191.4  | 161.4 | 164.0 | 502     | 229.3   | 403.8   | 325.7      | 293.3     | 163.0             | 130.3 | 128.8 | 217.6   | 220.3   |
| Sr                             | 1008             | 738    | 1181  | 1305  | 390     | 1310    | 1777    | 975        | 774       | 1284              | 1203  | 1253  | 494     | 243     |
| Y                              | 21.3             | 16.3   | 48.6  | 37.6  | 67      | 60.2    | 61.4    | 7.5        | 12.1      | 35.7              | 33.1  | 33.9  | 15.3    | 22.9    |
| Zr                             | 771              | 344    | 1174  | 545   | 13702   | 2011    | 645     | 173        | 82        | 501               | 347   | 384   | 308     | 522     |
| Nb                             | 14.1             | 12.1   | 39.4  | 30.9  | 219     | 85.2    | 46      | 3.2        | 3.8       | 29.1              | 21.7  | 22.4  | 30.8    | 30.9    |
| Mo                             | 2.9              | 5.4    | 1.7   | 2.6   | 0.55    | 2.9     | 2.0     | 1.4        | 1.6       | 2.0               | 1.2   | 1.5   | 3.5     | 0.8     |
| Cs                             | 1.7              | 1.7    | 9.3   | 3.5   | 93      | 15.1    | 14.5    | 2.3        | 1.8       | 3.4               | 1.5   | 1.3   | 3.3     | 3.4     |
| Ba                             | 904              | 426    | 2193  | 2094  | 354     | 2162    | 2146    | 909        | 821       | 1928              | 2123  | 1931  | 1355    | 760     |
| La                             | 50               | 31     | 165   | 119   | 252     | 143     | 216     | 34         | 47        | 140               | 75    | 101   | 48      | 62      |
| Ce                             | 78               | 70     | 275   | 238   | 389     | 281     | 361     | 54         | 70        | 262               | 143   | 197   | 92      | 90      |
| Pr                             | 8                | 8      | 32    | 27    | 38      | 30      | 38      | 5          | 6         | 27                | 16    | 23    | 11      | 8       |
| Nd                             | 27               | 29     | 111   | 97    | 115     | 98      | 119     | 16         | 20        | 94                | 59    | 84    | 38      | 24      |
| Sm                             | 3.9              | 4.8    | 18.2  | 15.1  | 17.7    | 15.9    | 19.0    | 2.1        | 2.6       | 14.5              | 10.3  | 13.7  | 5.8     | 3.6     |
| Eu                             | 0.8              | 1.0    | 3.7   | 3.4   | 3.5     | 3.5     | 4.1     | 0.4        | 0.5       | 3.0               | 2.0   | 3.0   | 1.0     | 0.7     |
| Gd                             | 3.4              | 3.7    | 14.2  | 11.6  | 13.4    | 12.8    | 14.8    | 1.7        | 2.2       | 11.1              | 8.1   | 10.5  | 3.9     | 3.3     |
| Tb                             | 0.4              | 0.5    | 1.8   | 1.4   | 1.84    | 1.7     | 1.8     | 0.2        | 0.3       | 1.4               | 1.1   | 1.4   | 0.5     | 0.6     |
| Dy                             | 2.1              | 2.6    | 9.4   | 7.4   | 11.3    | 9.0     | 9.8     | 0.9        | 1.3       | 7.0               | 6.1   | 6.6   | 2.8     | 3.6     |
| Ho                             | 0.4              | 0.5    | 1.7   | 1.3   | 2.7     | 1.6     | 1.7     | 0.2        | 0.2       | 1.2               | 1.2   | 1.2   | 0.6     | 0.8     |
| Er                             | 1.2              | 1.3    | 5.0   | 3.5   | 9.3     | 5.1     | 4.9     | 0.5        | 0.7       | 3.4               | 3.2   | 3.2   | 1.6     | 2.6     |
| Tm                             | 0.2              | 0.2    | 0.8   | 0.5   | 1.44    | 0.9     | 0.7     | 0.1        | 0.1       | 0.5               | 0.5   | 0.5   | 0.3     | 0.4     |
| Yb                             | 1.8              | 1.5    | 4.8   | 3.4   | 9.0     | 5.3     | 4.0     | 0.5        | 0.7       | 3.1               | 3.0   | 3.0   | 1.9     | 2.9     |
| Lu                             | 0.4              | 0.3    | 0.7   | 0.5   | 1.17    | 0.8     | 0.6     | 0.1        | 0.1       | 0.5               | 0.4   | 0.4   | 0.3     | 0.4     |
| Hf                             | 22.4             | 11.2   | 24.0  | 12.7  | 187     | 38.7    | 13.0    | 5.7        | 2.5       | 11.6              | 7.6   | 9.5   | 8.1     | 11.7    |
| Ta                             | 0.4              | 0.6    | 1.6   | 1.7   | 3.3     | 2.5     | 1.9     | 0.1        | 0.1       | 1.7               | 1.6   | 1.4   | 2.5     | 2.1     |
| Pb                             | 11.9             | 7.5    | 112.6 | 24.1  | 154     | 162     | 209     | 7.6        | 8.6       | 37.1              | 26.3  | 57.0  | 25.4    | 14.1    |
| Th                             | 7.4              | 0.8    | 36.1  | 17.9  | 39      | 82      | 105     | 5.4        | 3.0       | 19.4              | 15.7  | 14.1  | 23.6    | 27.6    |
| U                              | 1.4              | 0.7    | 8.6   | 3.1   | 175     | 22.8    | 16.3    | 1.2        | 0.6       | 4.5               | 2.8   | 3.3   | 9.3     | 5.6     |

Примечание. Здесь и в последующих таблицах: \*рудный сиенит, \*\*альбитизированный сиенит, bdl – ниже предела обнаружения. Оксиды даны в мас. %, элементы – в г/т.

на рис. 7. Изотопный состав кислорода в амфиболе из нефелиновых сиенитов, в том числе рудоносных, варьирует от +3.3 до +4.6 ‰. Минерал щелочных сиенитов из краевой зоны характеризуется значением +6.7‰, а кварцевых сиенитов и гранитов — +7.2 и +11.3‰ соответственно. В клинопироксене нефелиновых сиенитов  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  равно +4.0‰, в минерале щелочных сиенитов из краевой зоны выше, +7.0‰. Биотит нефелиновых сиенитов имеет  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  +4.5‰, минерал кварцевых сиенитов и гранитов — +8 и +8.5‰ соответственно. Апатит нефелиновых сиенитов дает  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ , равное +4.9‰, гранитов — +11.4‰.

Результаты Sr-Nd-Pb изотопных составов пород массива представлены в табл. 3 и 4 и на рис. 8.

В нефелиновых сиенитах первичные значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  колеблются в достаточно узком интервале от 0.7080 до 0.7084, альбитизированные различия показывают значения 0.7079 и 0.7102.  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$  в нефелиновых сиенитах, рассчитанные на 290 млн лет, варьируют от -10.9 до -11.6, а в альбитизированных различия равны -11.1 и -11.9.

Первичные значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , полученные для щелочных (0.7080–0.7089) и кварцевых сиенитов (0.7080–0.7086), схожи с таковыми для нефелиновых сиенитов. Лишь один образец рудоносного щелочного сиенита (БП-116) имеет отличное значение ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>T</sub> 0.7128 от приведенного диапазона для пород массива, при том, что он не подвержен интенсивными вторичными изменениями. Первичные  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  значения в альбитизированных

щелочных сиенитах равны 0.7071 и 0.7081. Величины  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$  в щелочных сиенитах и их альбитизированных различия составляют -10.4 ÷ -11.7. Кварцевые сиениты характеризуются в целом более высокими значениями  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$  от -10.2 до -10.9.

Два проанализированных образца гранита из массива дали контрастные друг к другу первичные значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.71068 и 0.70470) и  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$  (-13.4 и -11.2). Для образца песчаника, представляющего вмещающие породы холоднинской свиты терригенного комплекса, значения, пересчитанные на 290 млн лет ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>T</sub> и  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ , равны 0.7182 и -7.9 соответственно.

На диаграмме ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>T</sub>- $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$  (рис. 8а) значения для пород массива Бурпала схожи с таковыми для щелочных пород массива Сынный (Саватенков и др., 2019; неопубликованные данные авторов). В то же время первичные изотопные значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в породах массива Бурпала являются несколько более высокими по сравнению с таковыми в породах массива Сынный.

На диаграмме в координатах  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 8б) породы массива образуют линейный тренд, где нефелиновые сиениты, располагаясь в левой нижней части тренда, характеризуются более примитивным изотопным составом Pb. Щелочные и кварцевые сиениты демонстрируют смещение в область более радиогенного состава Pb. Кроме того, в верхнем окончании тренда щелочных пород массива Бурпала располагается точка для образца вмещающей породы (песчаник)

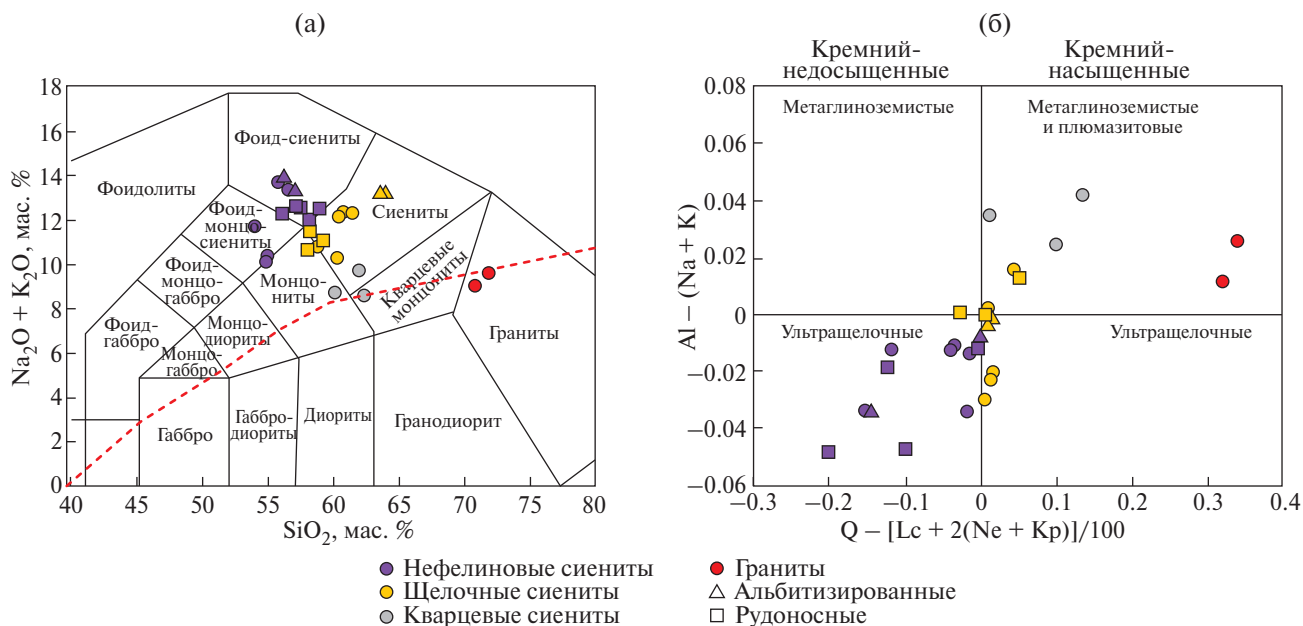
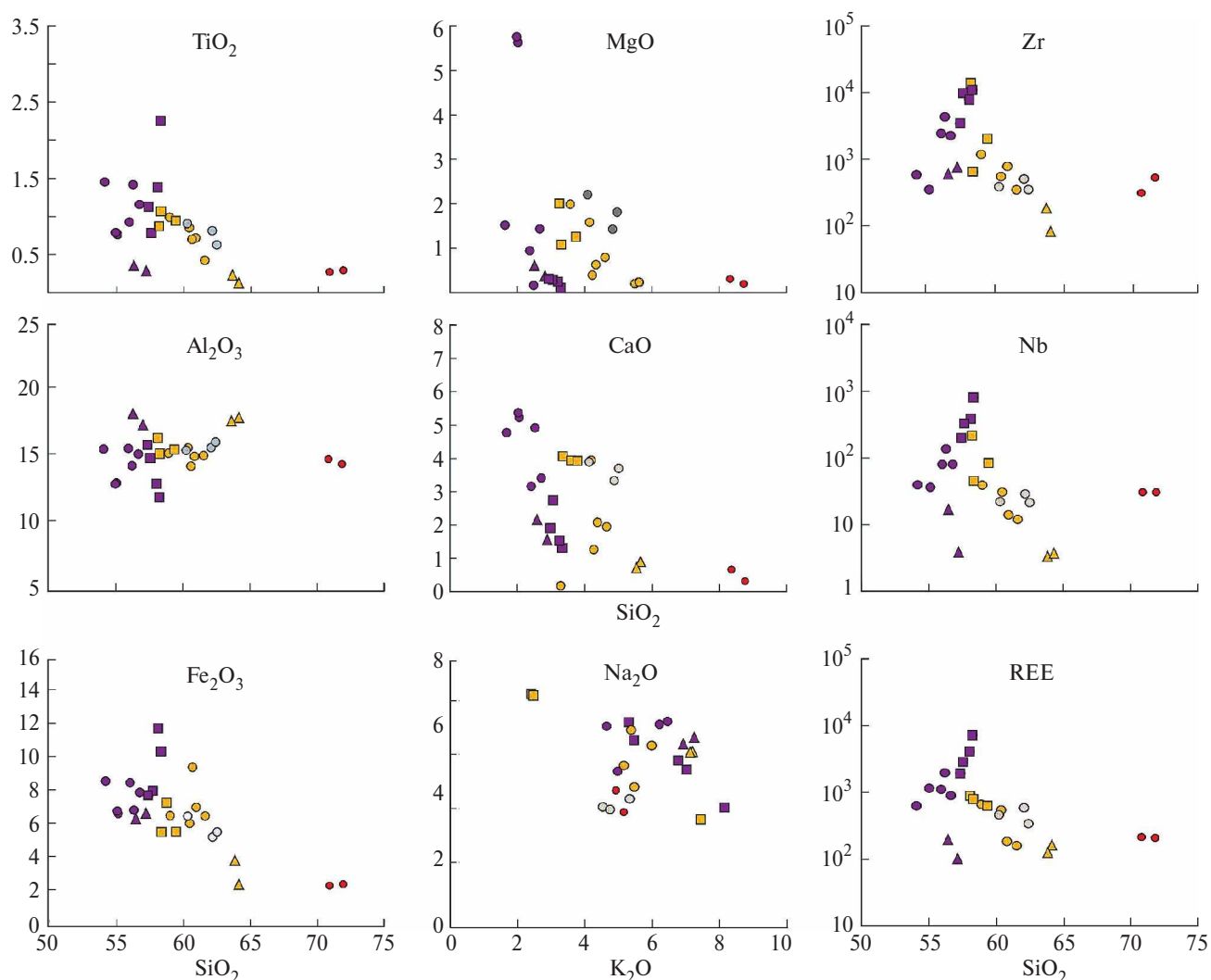


Рис. 4. Классификационная диаграмма SiO<sub>2</sub> vs (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) (a) (Middlemost, 1994) и диаграмма Al - (Na + K) - FSSI (b) (Frost, Frost, 2008) для основных разновидностей пород массива Бурпала. FSSI = нормативные  $Q - [Lc + 2(Ne + Kp)]/100$ .





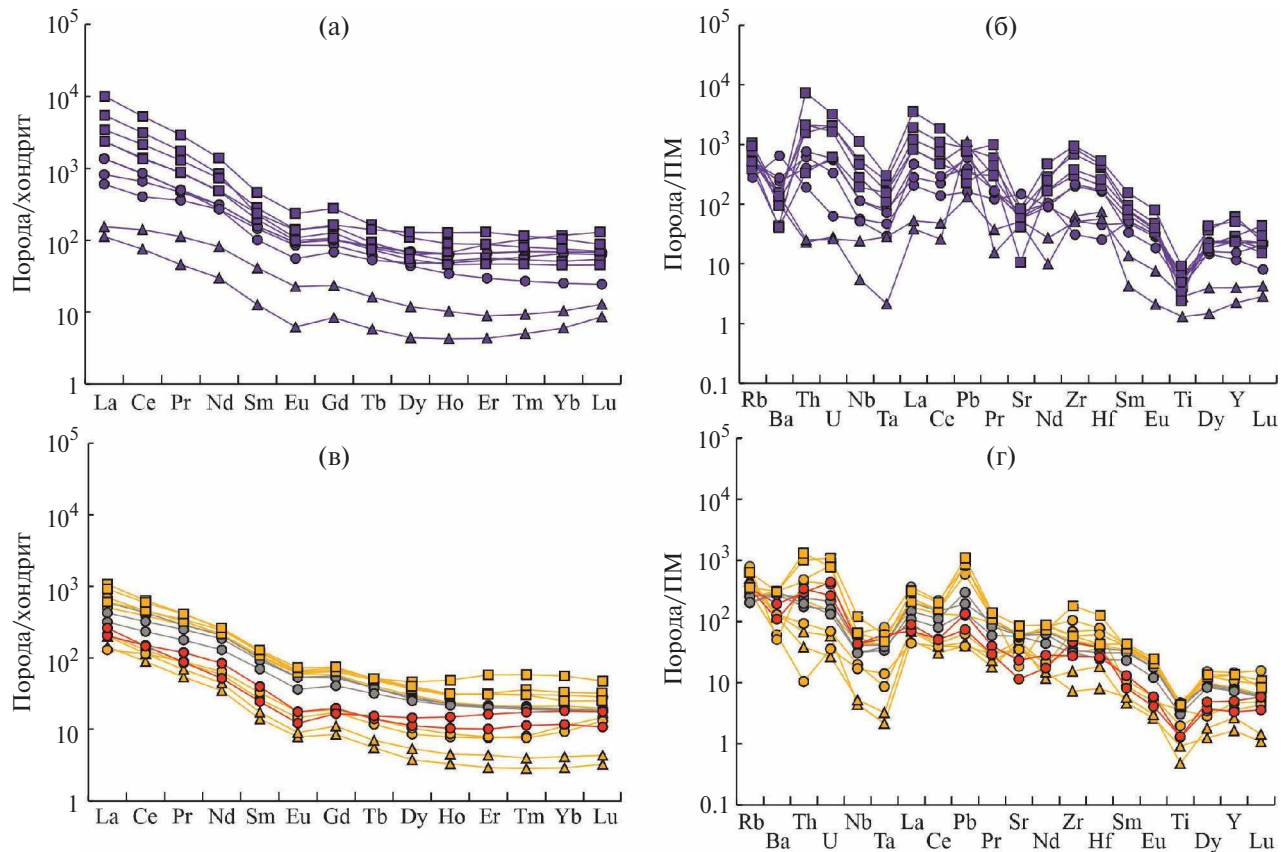
**Рис. 5.** Вариации содержаний основных петрогенных (мас. %) и редких (ppm) компонентов в основных разновидностях пород массива Бурала. Условные обозначения см. на рис. 4.

холоднинской свиты терригенного комплекса. От указанного тренда существенно отклоняются точки изотопного состава в образце рудоносного щелочного сиенита (БП-116) и образце щелочного гранита (Брз 5-2) (табл. 4), U-Pb изотопные характеристики которых определялись по породе в целом. Рудоносный сиенит характеризуется аномально высоким значением U/Pb, что приводит к значительным неопределенностям в оценке первичных изотопных характеристик Pb. В силу высокой мобильности U и Pb, на оценке первичных изотопных характеристик могло отразиться нарушение U/Pb изотопных соотношений в результате наложенных процессов (в том числе и гипергенных). Щелочной гранит характеризуется менее высоким значением U/Pb, однако отклонение изотопных характеристик Pb в этом образце от общей совокупности

на диаграмме  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  может объясняться теми же причинами.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные петролого-геохимические данные так же, как и опубликованные геохронологические данные (Избродин и др., 2024), позволяют предположить, что кварцевые, щелочные и нефелиновые сиениты были, вероятно, образованы независимыми импульсами внедрения и их формирование вряд ли происходило в рамках единого простого процесса фракционной кристаллизации, что хорошо видно на петрохимических бинарных диаграммах. Они характеризуются широкими вариациями как по большинству основных, так и по РЗЭ и редким элементам. При этом геологические наблюдения (Пак и др., 1962; Портнов, 1965; Андреев,



**Рис. 6.** Содержания РЗЭ (а, б) и редких элементов (в, г), нормированные к хондриту и примитивной мантии (ПМ) (Sun, McDonough, 1989) соответственно в породах массива Бурпала. Условные обозначения см. на рис. 4.

1981), близкие Sr-Nd изотопные характеристики, конфигурация геохимических спектров подтверждают сингенетичность магм, из которых кристаллизуются нефелиновые, щелочные и кварцевые сиениты. Дайки щелочных гранитов характеризуются схожими с сиенитами геохимическими параметрами и близкими значениями  $\epsilon_{Nd}(T)$ , отличаясь варьирующим Sr-Pb изотопным составом. Вариации последних, наиболее вероятно, согласно петрографическим наблюдениям, связаны с процессами

**Таблица 2.**  $\delta^{18}O_{SMOW}$  в минералах из пород массива Бурпала

| Порода                            | Нефелиновый сиенит |          |         |          |         |         |         | Щелочной сиенит |     | Кварцевый сиенит |     | Гранит |      |      |
|-----------------------------------|--------------------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|-----------------|-----|------------------|-----|--------|------|------|
| Образец                           | Брз 5-6            | Брз 5-12 | Брз 5-5 | Брз 5-6в | Брз 5-5 | Брз 5-7 | Брз 5-6 | К-14            |     | Ю-5              |     | Ю-7    |      |      |
| Минерал                           | Amp                |          |         |          | Cpx     | Bt      | Ap      | Amp             | Cpx | Bt               | Amp | Bt     | Ap   | Amp  |
| δ <sup>18</sup> O <sub>SMOW</sub> | 3.3                | 4.1      | 4.6     | 4.2      | 4       | 4.5     | 4.9     | 6.7             | 7   | 8                | 7.2 | 8.5    | 11.4 | 11.3 |

Примечание. Amp – амфибол, Cpx – клинопироксен, Bt – биотит, Ap – апатит.

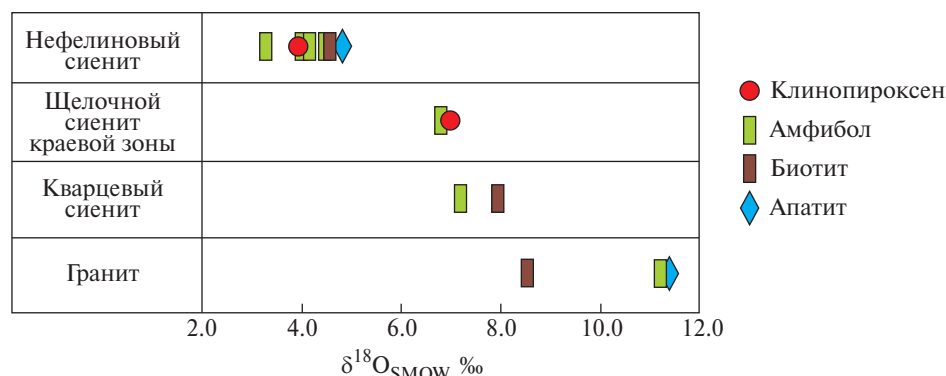


Рис. 7. Изотопный состав кислорода в минералах основных разновидностей пород массива Бурпала.

вторичного изменения пород. Тем не менее имеющиеся данные позволяют предполагать генетическое родство сиенитов массива и даек гранитов.

Считается, что нефелиновые и щелочные сиениты могут формироваться из расплавов нефелиникового либо щелочно-базитового, или базанитового состава (например, Kramm, Kogarko, 1994; Arzamastsev et al., 2001; Riishuus et al., 2008; Marks et al., 2011). Учитывая имеющуюся отрицательную Eu-аномалию и достаточно низкую магнезиальность пород массива, можно полагать, что породы кристаллизовались из расплава щелочно-базитового состава, из которого произошла отсадка оливина и плагиоклаза. Стоит отметить, что в некоторых работах по массиву Бурпала описаны дайки шонкинитов, находящиеся во вмещающих породах в западной части массива и относимые к ранней фазе (Владыкин и др., 2014). Авторы считают, что все разновидности пород массива являются продуктами дифференциации единой щелочной магмы. При этом существование когенетичных кварцевых и нефелиновых сиенитов является проблематичным из-за наличия термального барьера в системе  $Ne-Kfs-Qz-H_2O$ , в которой расплав будет эволюционировать либо в сторону гранитного минимума, либо в сторону нефелин-сиенитового минимума. Поэтому ассоциация кварцевых сиенитов одновременно с нефелиновыми сиенитами поднимает вопрос важности не только процесса фракционной кристаллизации в эволюции исследуемого комплекса, но и ассимиляции щелочными расплавами силикатического вещества континентальной коры, где комбинация процесса фракционирования с контаминацией в различных пропорциях может объяснить эти несоответствия.

Известно, что нефелиновые сиениты могут формироваться при ассимиляции карбонатных пород. Яркими примерами являются палеозойские щелочные комплексы Алтае-Саянской складчатой области (Vorontsov et al., 2021) и Витимского плоскогорья в Западном Забайкалье (Doroshkevich et al., 2012; Izbrodin et al., 2020), где вмещающими

породами являются осадочные карбонатные толщи, а в щелочных породах комплексов присутствует кальцит. Что касается массива Бурпала, то этот вариант маловероятен. Здесь вмещающие породы представлены терригенно-осадочными (песчаники, алевролиты), а петрографо-минералогические данные не подтверждают механизм взаимодействия с осадочными карбонатами. Петролого-геохимические исследования также исключают такую возможность, поскольку нефелиновые сиениты характеризуются обогащенностью РЗЭ и высокозарядными элементами относительно щелочных и кварцевых сиенитов, а не наоборот.

Вторым возможным вариантом может быть процесс коровой контаминации с участием пород с высоким содержанием кремния. В работе (Riishuus et al., 2008) предложен механизм, согласно которому подплавление коры может происходить в зоне кровли над магматическим очагом (щелочно-базальтового или базанитового составов). Как результат смешения с образовавшимся коровым расплавом в зоне кровли формируется пересыщенная кремнеземом магма, внедрение которой сопровождается кристаллизацией на поверхности самых внешних обнаженных кварцевых сиенитов. Затем продолжающееся пульсационное поступление из камеры порций магм, недосыщенных кремнеземом, приводит к формированию нефелиновых и щелочных сиенитов. При этом эволюция в сторону кремний-недосыщенного ультращелочного поля (рис. 4б) отчасти обусловлена «эффектом плагиоклаза», при котором на образование кальциевого плагиоклаза расходуется Al, но мало Na и K. Этот процесс согласуется с отрицательной Eu-аномалией, отображаемой на спектрах РЗЭ для нефелиновых сиенитов.

В опубликованных работах, рассматривающих вариант образования кварцевых сиенитов в результате процесса коровой контаминации, в качестве весомых аргументов приводятся изменяющиеся изотопные и редкоэлементные характеристики

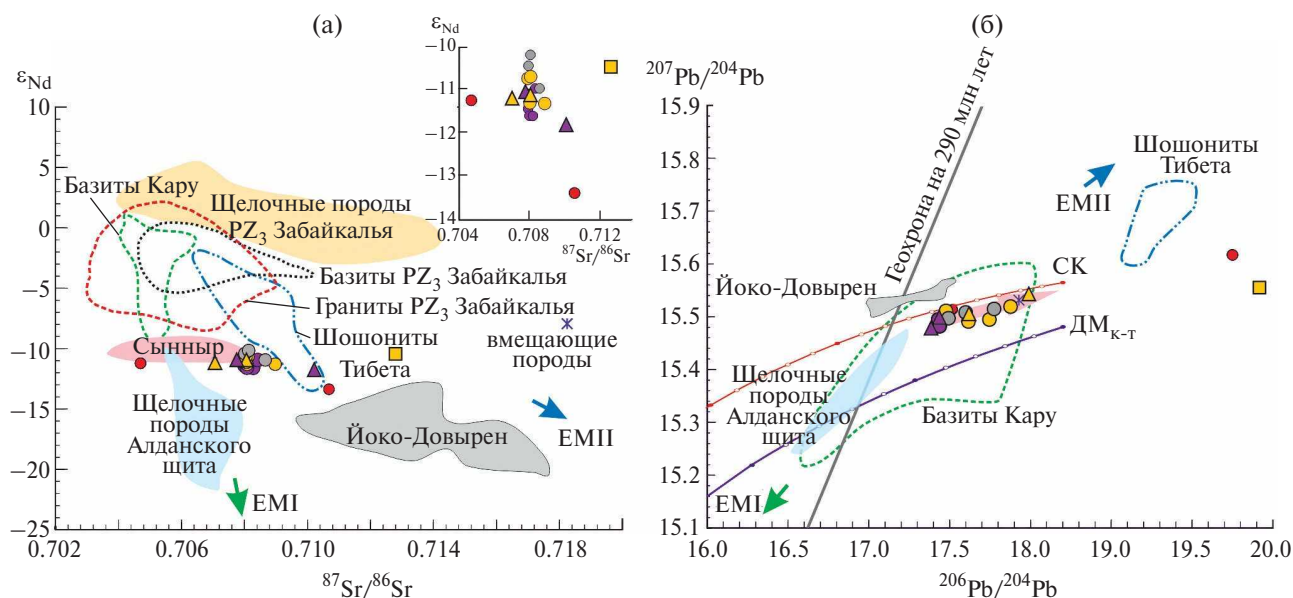


Таблица 3. Rb-Sr и Sm-Nd изотопный состав пород массива Бурпала

| Порода                | Образец     | Rb,<br>г/г | Sr, г/г | <sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr | <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr | ±2s | I (Sr)   | Sm, г/г | Nd, г/г | <sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd | <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd | ±2s | ε <sub>Nd</sub> (T) |
|-----------------------|-------------|------------|---------|------------------------------------|------------------------------------|-----|----------|---------|---------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----|---------------------|
| Нефелиновый<br>сиенит | Брз 5-5     | 414.6      | 1717    | 0.7001                             | 0.710891                           | 5   | 0.708002 | 23.46   | 142.79  | 0.0993                               | 0.511868                             | 2   | -11.42              |
|                       | Брз 5-12    | 332.1      | 1302    | 0.7392                             | 0.711468                           | 5   | 0.708418 | 22.06   | 133.90  | 0.0996                               | 0.511893                             | 5   | -10.94              |
|                       | Брз 5-8     | 454.1      | 1345    | 0.9795                             | 0.712117                           | 6   | 0.708075 | 14.90   | 124.19  | 0.0725                               | 0.511809                             | 5   | -11.58              |
|                       | Брз 5-7     | 209.0      | 3375    | 0.1795                             | 0.709016                           | 5   | 0.708275 | 21.16   | 114.12  | 0.1121                               | 0.511884                             | 5   | -11.58              |
|                       | Брз 5-126** | 533.5      | 1082    | 1.4311                             | 0.713866                           | 7   | 0.707961 | 1.75    | 12.87   | 0.0823                               | 0.511853                             | 3   | -11.08              |
|                       | Брз 5-12a** | 140.4      | 915     | 0.4455                             | 0.712056                           | 4   | 0.710218 | 12.12   | 61.30   | 0.1195                               | 0.511884                             | 4   | -11.86              |
| Щелочной<br>сиенит    | К-14        | 107.4      | 1239    | 0.2515                             | 0.710016                           | 4   | 0.708978 | 12.24   | 70.81   | 0.1045                               | 0.511884                             | 4   | -11.30              |
|                       | БЗ 5-1      | 225.4      | 798     | 0.8191                             | 0.711463                           | 4   | 0.708083 | 5.09    | 30.99   | 0.0993                               | 0.511874                             | 3   | -11.30              |
|                       | Брз 5-3     | 297.0      | 1049    | 0.8211                             | 0.711502                           | 7   | 0.708114 | 3.87    | 25.94   | 0.0902                               | 0.511888                             | 5   | -10.69              |
|                       | БП-11       | 202.9      | 1333    | 0.4412                             | 0.709866                           | 5   | 0.708045 | 18.00   | 112.36  | 0.0968                               | 0.511899                             | 3   | -10.72              |
|                       | БП 11б      | 477.0      | 417     | 3.3248                             | 0.726513                           | 6   | 0.712793 | 16.92   | 112.71  | 0.0908                               | 0.511902                             | 6   | -10.44              |
|                       | Брз 5-11**  | 372.3      | 1016    | 1.0623                             | 0.712445                           | 7   | 0.708061 | 2.07    | 15.40   | 0.0812                               | 0.511848                             | 5   | -11.14              |
| Кварцевый<br>сиенит   | Брз 5-4**   | 249.6      | 510     | 1.4228                             | 0.712967                           | 5   | 0.707096 | 2.30    | 15.65   | 0.0886                               | 0.511858                             | 6   | -11.22              |
|                       | Ю-6         | 145.0      | 1247    | 0.337                              | 0.709526                           | 6   | 0.708135 | 9.62    | 54.58   | 0.1065                               | 0.511946                             | 4   | -10.17              |
|                       | Ю-5         | 108.6      | 1230    | 0.2559                             | 0.709715                           | 5   | 0.708659 | 22.06   | 133.90  | 0.0996                               | 0.511893                             | 5   | -10.94              |
|                       | БП 11а      | 197.6      | 1420    | 0.4035                             | 0.70968                            | 6   | 0.708015 | 15.08   | 96.57   | 0.0944                               | 0.51191                              | 4   | -10.42              |
| Гранит                | Ю-7         | 251.0      | 511     | 1.4247                             | 0.716562                           | 4   | 0.710683 | 5.51    | 36.47   | 0.0913                               | 0.511753                             | 4   | -13.37              |
|                       | Брз 5-2     | 217.8      | 168     | 3.7375                             | 0.720124                           | 5   | 0.704701 | 5.02    | 35.05   | 0.0865                               | 0.511854                             | 5   | -11.22              |
| Вмещающий<br>песчаник | Ю-2         | 63.9       | 132     | 1.3883                             | 0.723972                           | 5   | 0.718243 | 4.92    | 23.30   | 0.1275                               | 0.5121                               | 4   | -7.94               |

Таблица 4. U-Pb изотопный состав пород массива Бурпала

| Порода                | Образец         | Pb, г/г | U, г/г | <sup>238</sup> U/ <sup>204</sup> Pb | <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | %    | <sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | %    | <sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | %    | ( <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb) <sub>i</sub> | ( <sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb) <sub>i</sub> |
|-----------------------|-----------------|---------|--------|-------------------------------------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Нефелиновый<br>сиенит | Брз 5-5 (ПШ)    | 70.00   | 6.39   | 5.70                                | 17.893                               | 0.06 | 15.499                               | 0.06 | 38.463                               | 0.09 | 17.631                                               | 15.485                                               |
|                       | Брз 5-12(вал)   | 113.00  | 10.40  | 5.76                                | 17.895                               | 0.06 | 15.504                               | 0.06 | 38.028                               | 0.09 | 17.630                                               | 15.490                                               |
|                       | Брз 5-8 (ПШ)    | 2.66    | 0.39   | 9.37                                | 18.271                               | 0.06 | 15.519                               | 0.06 | 40.073                               | 0.09 | 17.840                                               | 15.497                                               |
|                       | Брз 5-7 (ПШ)    | 14.20   | 0.21   | 0.94                                | 17.649                               | 0.06 | 15.479                               | 0.06 | 37.773                               | 0.09 | 17.606                                               | 15.477                                               |
|                       | Брз 5-12б**(ПШ) | 66.50   | 0.01   | 0.01                                | 17.632                               | 0.06 | 15.494                               | 0.06 | 37.825                               | 0.09 | 17.631                                               | 15.494                                               |
|                       | Брз 5-12а**(ПШ) | 6.19    | 0.13   | 1.26                                | 17.736                               | 0.06 | 15.505                               | 0.06 | 37.933                               | 0.09 | 17.678                                               | 15.502                                               |
| Щелочной<br>сиенит    | К-14 (ПШ)       | 11.50   | 0.25   | 1.36                                | 17.907                               | 0.06 | 15.503                               | 0.06 | 38.056                               | 0.09 | 17.844                                               | 15.500                                               |
|                       | БЗ 5-1 (вал)    | 15.40   | 4.89   | 1.99                                | 18.087                               | 0.06 | 15.499                               | 0.06 | 38.029                               | 0.06 | 17.996                                               | 15.494                                               |
|                       | Брз 5-3 (вал)   | 9.69    | 1.26   | 8.19                                | 18.220                               | 0.06 | 15.513                               | 0.06 | 38.375                               | 0.09 | 17.843                                               | 15.493                                               |
|                       | БП-11 (ПШ)      | 6.00    | 1.35   | 14.34                               | 18.933                               | 0.06 | 15.573                               | 0.06 | 38.203                               | 0.06 | 18.273                                               | 15.539                                               |
|                       | БП 11б (вал)    | 5.44    | 33.16  | 567.80                              | 46.058                               | 0.06 | 16.911                               | 0.06 | 44.021                               | 0.09 | 19.932                                               | 15.550                                               |
|                       | Брз 5-11**(вал) | 3.37    |        |                                     | 18.145                               | 0.06 | 15.519                               | 0.06 | 38.436                               | 0.09 | 18.145                                               | 15.519                                               |
| Кварцевый<br>сиенит   | Брз 5-4**(ПШ)   | 2.04    | 0.05   | 1.39                                | 17.747                               | 0.02 | 15.509                               | 0.02 | 37.986                               | 0.03 | 17.683                                               | 15.506                                               |
|                       | Ю-6 (ПШ)        | 20.50   | 4.11   | 1.25                                | 17.881                               | 0.06 | 15.509                               | 0.06 | 38.125                               | 0.09 | 17.823                                               | 15.506                                               |
|                       | Ю-5 (вал)       | 21.99   | 3.09   | 8.88                                | 18.109                               | 0.06 | 15.518                               | 0.06 | 38.459                               | 0.09 | 17.701                                               | 15.497                                               |
|                       | БП 11а (вал)    | 51.60   | 4.53   | 5.59                                | 18.286                               | 0.06 | 15.528                               | 0.06 | 38.819                               | 0.09 | 18.028                                               | 15.514                                               |
| Гранит                | Ю-7 (вал)       | 20.20   | 5.99   | 19.00                               | 18.581                               | 0.06 | 15.552                               | 0.06 | 39.204                               | 0.09 | 17.706                                               | 15.506                                               |
|                       | Брз 5-2 (вал)   | 12.58   | 4.73   | 25.59                               | 20.937                               | 0.06 | 15.685                               | 0.06 | 41.152                               | 0.09 | 19.759                                               | 15.624                                               |
| Вмещающий<br>песчаник | Ю-2 (вал)       | 14.50   | 1.97   | 8.61                                | 18.600                               | 0.06 | 15.552                               | 0.06 | 38.578                               | 0.09 | 18.204                                               | 15.531                                               |



**Рис. 8.**  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_T$ — $\epsilon_{Nd}(T)$  изотопные отношения (а) и  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_T$ — $(^{207}Pb/^{204}Pb)_T$  диаграмма (б) для пород массива Бурпала. Условные обозначения см. на рис. 4.

(а): данные для позднепалеозойских щелочных пород Забайкалья (Doroshkevich et al., 2012; Izbrodin et al., 2020), позднепалеозойских гранитоидов и базитов Забайкалья (Jahn et al., 2009; Litvinovsky et al., 2011; Цыганков и др., 2019; Tsygankov et al., 2017), мезозойских щелочных пород Алдано-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 Сынныр (Саватенков и др., 2019; неопубликованные данные авторов), постколлизийных шошонитов Тибета (Guo et al., 2006; Ou et al., 2019), вулканических пород юрской изверженной провинции Кару (Jourdan et al., 2007).

(б): СК — эволюция Pb в Сибирском кратоне (Ларин и др., 2021); ДМ<sub>к-т</sub> — эволюция Pb в деплетированной мантии (Kramers, Tolstikhin, 1997). Розовая стрелка — тренд ассимиляции.

пород (например, Riishuus et al., 2008; Estrade et al., 2014).

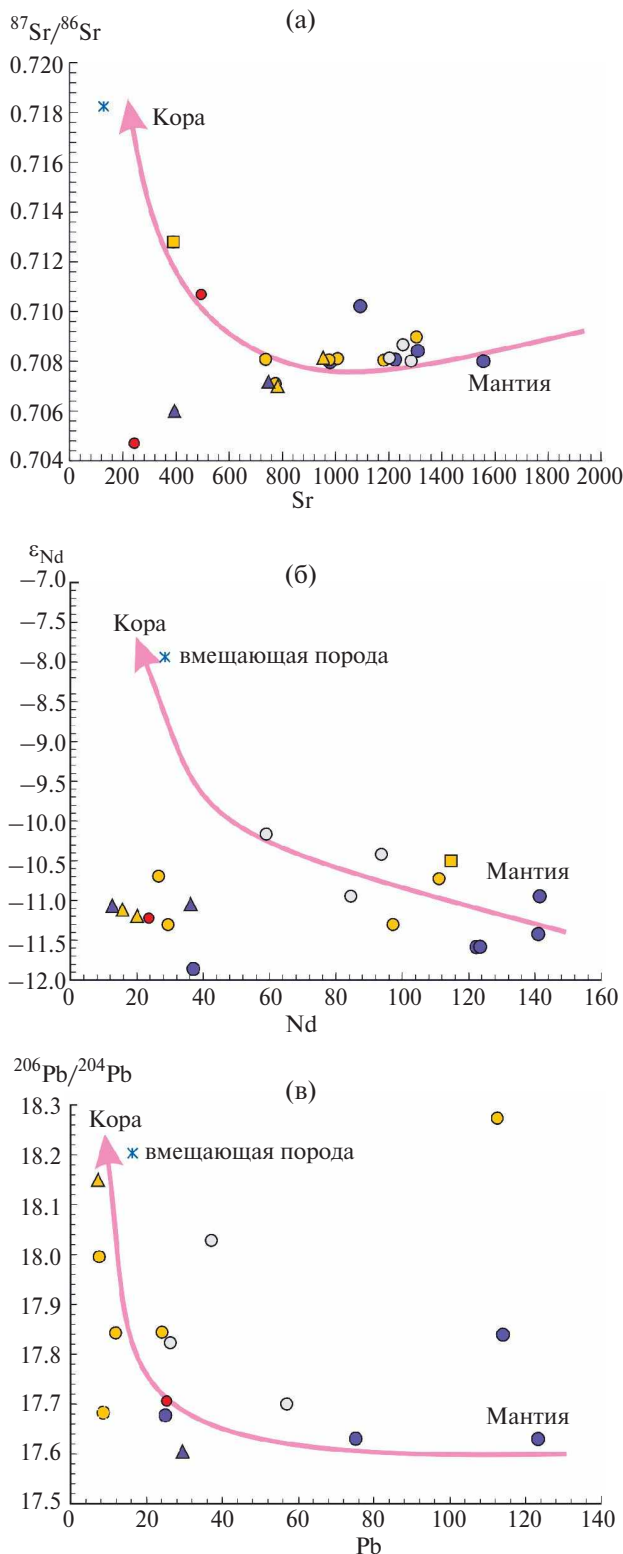
Изотопные характеристики Sr и Nd в породах массива Бурпала явно не отражают процесса взаимодействия щелочных расплавов с веществом континентальной коры в ходе ее ассимиляции. Во-первых, Sr и Nd изотопные составы в породах массива Бурпала проявляют слабую вариацию, а во-вторых, не демонстрируют закономерного изменения относительно других петрохимических и геохимических параметров для различных фаз внедрения, которое можно было бы охарактеризовать в рамках модели смешения или ассимиляции—фракционной кристаллизации (рис. 9). Это говорит о том, что веществом взаимодействие между мантийными щелочными расплавами и коровым веществом в ходе формирования интрузивного комплекса носило более сложный характер, вероятно, включающий метасоматическое взаимодействие. Слабые вариации изотопных характеристик Sr и Nd и отсутствие каких-либо очевидных трендов смешения корамантия для различных фаз внедрения указывают на то, что процессы ассимиляции корового вещества щелочными расплавами слабо отразились на изотопных характеристиках Sr и Nd в породах массива

Бурпала и эти характеристики близко отвечают параметрам мантийного источника этих пород.

В то же время изотопные характеристики Pb в породах массива Бурпала наиболее очевидно отражают процесс вещественного взаимодействия между мантийными щелочными расплавами и породами континентальной коры в ходе ее ассимиляции (рис. 9).

В наибольшей степени влияние процессов ассимиляции пород континентальной коры на изотопные характеристики Pb проявлено в щелочных и кварцевых сиенитах, в наименьшей — в нефелиновых сиенитах. Нефелиновые сиениты массива Бурпала, включая рудные разности, характеризуются наиболее высоким содержанием Pb, по сравнению с кварцевыми и щелочными сиенитами. Более низкое содержание Pb в ранних фазах внедрения, сопоставимое с таковым во вмещающих породах, обусловило заметный сдвиг изотопных характеристик Pb в щелочных породах в сторону параметров вмещающей их континентальной коры. Более высокое содержание Pb в нефелиновых сиенитах, наиболее вероятно, как и в случае других высоко несовместимых элементов литофильной группы, обусловлено процессами метасоматического обогащения



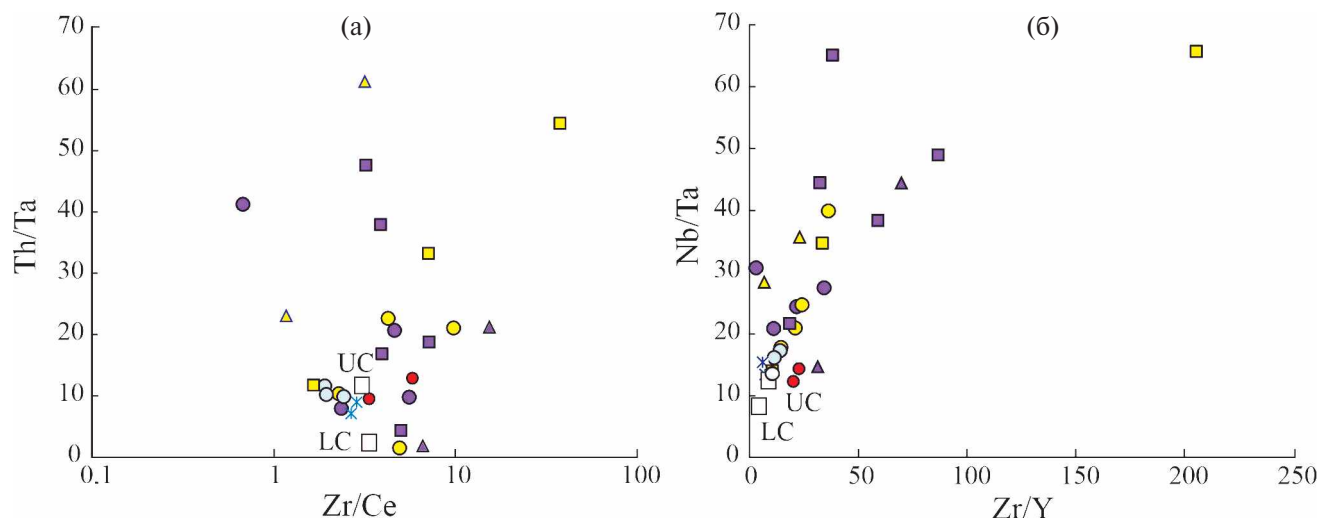


**Рис. 9.** Диаграммы Sr (ppm)— $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (а), Nd (ppm)— $\epsilon_{\text{Nd}}$  (б), Pb (ppm)— $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (в) для пород массива Бурпала. Розовая стрелка — тренд ассимиляции. Условные обозначения см. на рис. 4.

мантийных расплавов, внедрявшихся в магматическую камеру.

Стоит также отметить, что значения изотопного состава кислорода в разновидностях сиенитов значительно различаются, где минералы кварцевых сиенитов обладают гораздо более тяжелыми  $\delta^{18}\text{O}$  значениями, чем таковые нефелиновых и щелочных сиенитов. Несмотря на то, что все разновидности сиенитов обладают схожими геохимическими характеристиками, наблюдаются закономерные различия в поведении некоторых редких элементов. Так, на диаграммах Zr/Ce—Th/Ta и Zr/Y—Nb/Ta (рис. 10) можно видеть, что кварцевые сиениты расположены в непосредственной близости к значениям для верхней коры (Rudnik, Gao, 2014) и вмещающих песчаников холоднинской свиты, в то время как нефелиновые и щелочные сиениты характеризуются значительным разбросом значений и не тяготеют к значениям для вмещающих пород.

Sr—Nd—Pb изотопные характеристики пород массива Бурпала, а также особенности их редко-элементного состава указывают на их генетическую связь с древним источником метасоматизированной литосферной мантии. На диаграмму  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{T}} - \epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$  (рис. 8а) вместе с данными для пород массива Бурпала вынесены поля изотопных характеристик Сыннырского массива, мезозойских щелочных пород Алдано-Станового щита и пород Йоко-Довыренского массива, расположенного в непосредственной близости к массивам Сынныр и Бурпала. Все вышеперечисленные комплексы характеризуются резко отрицательными значениями  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ . Исследователи (Bogatikov et al., 1994; Mitchell et al., 1994; Davies et al., 2006; Арискин и др., 2015; Васюкова и др., 2020; Doroshkevich et al., 2020) считают, что источником для мезозойских щелочных пород Алдано-Станового щита и пород Йоко-Довыренского массива являлась аномально обогащенная метасоматизированная литосферная мантия в данном регионе, обогащение которой относительно деплетированной мантии происходило в период архея—палеопротерозоя. Кроме того, изотопный состав палеопротерозойских мафических пород и карбонатитов в краевой южной части Сибирского кратона (Шарыжалгайский блок и Алдано-Становой щит) также свидетельствует о наличии изотопно-обогащенных доменов в литосферной мантии (например, Гонгальский и др., 2008; Doroshkevich et al., 2018; Туркина, Изох, 2023). Кроме крайне низких значений  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ , породы массива Бурпала характеризуются обогащением Ba, LILE, Th, легкими лантаноидами и демонстрируют мультиэлементные спектры с резкими минимумами по Nb—Ta, Ti и максимумами по Ba, Pb. Форма спектра редких элементов в нефелиновых сиенитах проявляет сходство с таковых мафических производных метасоматизированной мантии восточного сегмента (мезозойские лампроиты) и

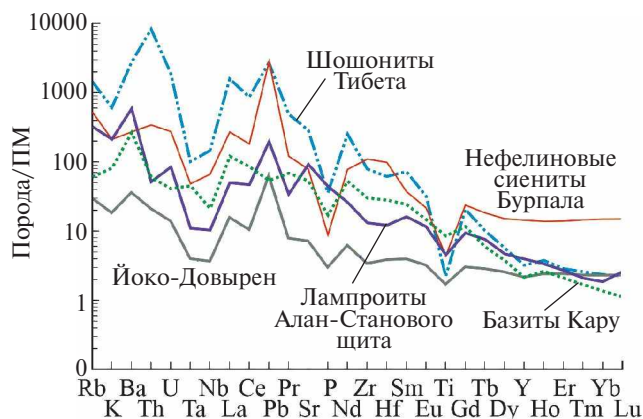


**Рис. 10.** Диаграммы Zr/Ce–Th/Ta (а) и Zr/Y–Nb/Ta (б) отношений в породах массива Бурпала. Условные обозначения см. на рис. 4. Значения для верхней (UC) и нижней коры (LC) по (Rudnick, Gao, 2014), вмещающие породы (синие крестики) – авторские данные.

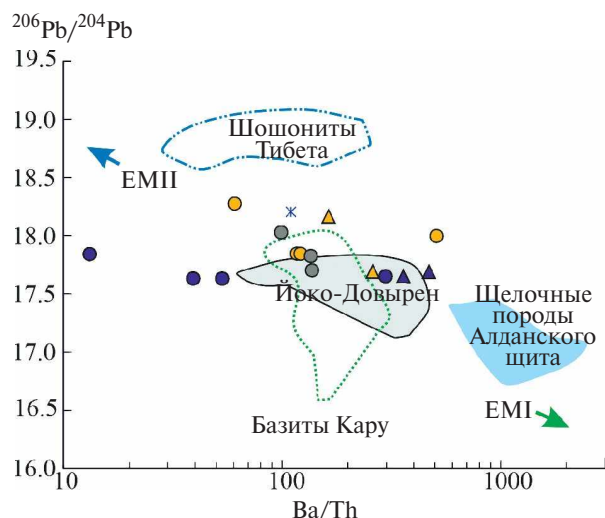
юго-западной окраины (неопротерозойские ультрабазиты массива Йоко-Довырен) Алдан-Станового щита (рис. 11).

Подобные формы спектра с Ta-Nb минимумом и Ba и Pb максимумами ассоциируются с надсубдукционными обстановками. Эти особенности, а также низкие значения  $\epsilon_{Nd}(T)$  в вышеуказанных породах указывают на то, что их обогащенный мантийный источник сформировался в результате аккреционных процессов в раннепротерозойский–архейский период формирования континентальной литосферы Сибирского кратона. Изотопные характеристики Sr, Nd и Pb в щелочных породах, формировавшихся в пределах различных доменов юга Сибирского кратона, на изотопных диаграммах (рис. 8) образуют различные поля. Это, в свою очередь, указывает на различие обстановок, в которых формировались обогащенные мантийные источники. Sr-Nd-Pb изотопные параметры мантийного источника мезозойских лампроитов восточного сегмента Алдан-Станового щита отвечают обогащенному источнику ЕМІ-типа. В то же время Sr-Nd-Pb изотопные параметры мантийного источника ультрабазитов Йоко-Довыренского массива, приуроченных к юго-западной окраине Алдан-Станового щита, тяготеют к полю источника ЕМІІ-типа. Изотопные характеристики пород массива Бурпала, как ультрабазитов Йоко-Довыренского массива и пород массива Сынныр, также характеризуются параметрами ЕМІІ-типа. Вместе с тем более высокие значения  $\epsilon_{Nd}(T)$  и более низкие ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )<sub>T</sub> в породах массива Бурпала, а также более низкие значения ( $^{207}Pb/^{204}Pb$ )<sub>T</sub> в нефелиновых сиенитах из этого массива, могут указывать либо на большую долю вещества деплетированной мантии при формировании этих пород, либо

на более молодой возраст обогащенного мантийного источника. С последним согласуется приуроченность массивов Бурпала и Сынныр к раннебайкальскому блоку континентальной литосферы Сибирского кратона, тогда как Йоко-Довыренский массив приурочен к Олоkitской рифтогенной зоне, которая расположена в пределах выступа раннеархейского фундамента Сибирского кратона.



**Рис. 11.** Сравнительная характеристика спектров распределения редких элементов, нормированных к примитивной мантии (ПМ) по (Sun, McDonough, 1989), для нефелиновых сиенитов массива Бурпала с мезозойскими лампроитами Алдан-Станового щита (Bogatikov et al., 1994; Mitchell et al., 1994; Davies et al., 2006), породами интрузии Йоко-Довырен (Арискин и др., 2015), шононитами Тибета (Guo et al., 2006; Ou et al., 2019), вулканическими породами юрской изверженной провинции Кару (Jourdan et al., 2007).



**Рис. 12.** Ba/Th— $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_T$  диаграмма для пород массива Бурпала. Условные обозначения см. на рис. 4.

Данные для мезозойских лампроитов Алдано-Станового щита (Bogatikov et al., 1994; Mitchell et al., 1994; Davies et al., 2006), расслоенной ультрабазит-базитовой интрузии Йоко-Довырен (Арискин и др., 2015), постколлизийных шошонитов Тибета (Guo et al., 2006; Ou et al., 2019), вулканических пород юрской изверженной провинции Кару (Jourdan et al., 2007).

Различия в изотопных характеристиках Sr, Nd и Pb между щелочными породами, формировавшимися в пределах различных доменов юга Сибирского кратона, отражают различия в геохимической специфике метасоматического преобразования литосферной мантии, при плавлении которой эти породы образовались. Наблюдаемые различия в изотопном составе Sr, Nd и Pb между породами разных районов юга Сибирского кратона согласуются с различиями в особенностях редко-элементного состава этих пород. Так, на диаграмме  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_T$ — $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_T$  (рис. 8б) видно, что мезозойские лампроиты Алдано-Станового щита характеризуются менее радиогенным изотопным составом Pb по сравнению со щелочными породами массивов Бурпала и Йоко-Довырен, расположенных на границе западного сегмента Байкало-Витимского пояса ЦАСП с краевой частью Сибирского кратона. При этом мезозойские лампроиты Алдано-Станового щита обладают более выраженным относительным обогащением такими флюидомобильными элементами, как Ba, Rb, K, Pb, Sr. В то же время породы массивов Бурпала и Йоко-Довырен отличаются большей степенью обогащения (относительно других элементов) высоко несовместимыми литофильными элементами — Th, U, Zr, Hf. Наиболее наглядно такое различие иллюстрируется диаграммой Ba/Th— $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 12), поскольку Ba является наиболее флюидомобильным

элементом, а Th — высоко несовместимым элементом, распределяющимся преимущественно в расплав.

Можно полагать, что метасоматически обогащенный мантийный источник для мезозойских лампроитов Алдано-Станового щита на момент его образования характеризовался пониженным значением U/Pb, а обогащенный мантийный источник пород массивов Бурпала и Йоко-Довырен — повышенным значением U/Pb. При этом на диаграмме  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_T$ — $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  (рис. 8а) поля составов мезозойских лампроитов, с одной стороны, и пород массивов Бурпала и Йоко-Довырен, с другой — имеют несколько разнонаправленные тренды.

Сходная закономерность отмечается и для пород из других регионов мира, являющихся продуктами плавления древней литосферы (рис. 8 и 12). Так, например, вулканические породы, представляющие юрскую изверженную провинцию Кару в пределах раннеархейского кратона Каапвал (Jourdan et al., 2007), по изотопно-геохимической специфике проявляют сходство с мезозойскими лампроитами Алдано-Станового щита. Или, например, постколлизийные шошониты Тибета, развитые в пределах докембрийских блоков Тибетского плато (Guo et al., 2006; Ou et al., 2019), отвечают источнику EMII-типа с более высоким обогащением радиогенным Pb.

Как было показано в работе (Pearce et al., 2005), различие в геохимической специфике мантийного метасоматоза (преимущественно флюидный или флюидно-расплавный) может проявляться в пределах единой тектонической обстановки, отвечающей конвергентной границе, и определяться спецификой субдукции океанической плиты (быстрая—медленная или холодная—горячая субдукция), а также удаленностью от фронтальной зоны. Это дает основание предполагать, что изотопно-геохимическая специфика обогащенных мантийных источников щелочных пород юга Сибирского кратона, определяющая их металлогеническую специализацию, является отражением условий и режимов процесса аккреции, приведшего в раннем докембрии к формированию древней литосферы Сибирского кратона.

Таким образом, изотопные и геохимические характеристики пород массива Бурпала отражают преобладание вещества древней метасоматизированной литосферной мантии в источнике с участием верхнекорового компонента в процессе становления интрузии. При этом роль плюмового компонента вряд ли была значимой, несмотря на то, что магматизм позднепалеозойского периода, связанный с плюмовой активностью, был широко проявлен в пределах Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса с формированием базитов, пород монцонит-гранитной



серии и щелочных комплексов (Jahn et al., 2009; Litvinovsky et al., 2011; Цыганков и др., 2019; Tsyganov et al., 2017; Doroshkevich et al., 2012; Izbrodin et al., 2020). Породы этих комплексов характеризуются гораздо более высокими значениями  $\epsilon_{Nd}(T)$  (рис. 8а), свидетельствующими о большем вкладе деплетированного астеносферного источника в их генезисе, даже с учетом того, что гетерогенная литосфера забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса, включающая раннедокембрийские кристаллические блоки и «молодые» террейны островодужного типа, обладает отличающимися характеристиками от литосферной мантии южного края Сибирского кратона.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные петролого-геохимические и изотопные (Sr, Nd, Pb, O) данные по кварцевым сиенитам, щелочным безнефелиновым и нефелиновым сиенитам массива Бурпала показали, что каждая разновидность пород имеет специфические петролого-геохимические особенности, с одной стороны, а с другой — обладает схожими характеристиками, подтверждающими сингенетичность магм, из которых кристаллизовались нефелиновые, щелочные и кварцевые сиениты. Породы кристаллизовались из расплава щелочно-базитового состава.

Изотопные и геохимические характеристики пород массива отражают преобладание вещества метасоматизированной литосферной мантии в источнике. При этом роль плюмового компонента была незначительной, в отличие от позднепалеозойских щелочных пород Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса. Резко отрицательные значения  $\epsilon_{Nd}(T)$  для исследуемых пород вписываются в региональную картину — подобные характеристики свойственны для других магматических комплексов (Сынныр, Йоко-Довырен). Формирование пород массива было осложнено ассимиляцией верхнекорового материала, что явилось наиболее вероятным фактором, определившим генетическую связь нефелиновых и кварцевых сиенитов в составе массива.

**Благодарности.** Авторы выражают огромную благодарность рецензентам А.А. Арзамасцеву и А.В. Никифорову за конструктивные замечания при рецензировании, позволившие улучшить первоначальный вариант рукописи.

**Источники финансирования.** Геологические исследования, в том числе анализы вмещающих пород, были выполнены в рамках госзаданий ИГМ СО РАН, ГИН СО РАН и ИГГД РАН (122041400241-5, AAAA-A21-121011390002-2, FMUW-2022-0005). Петролого-геохимические и изотопные (Sr, Nd, Pb, O) исследования были выполнены за счет

средств РНФ 22-17-00078, <https://rscf.ru/en/project/22-17-00078/>

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев А.А., Рыцк Е.Ю., Великославинский С.Д. и др. Возраст, состав и тектонические обстановки формирования позднебайкальских комплексов Кичерской зоны Байкало-Витимского пояса (Северное Прибайкалье): геологические, геохронологические (ID-TIMS, SIMS) и Nd-изотопные данные // Петрология. 2022. Т. 30. № 4. С. 345–378.

Андреев Г.В. Петрология формации калиевых, нефелиновых и щелочных сиенитов. Новосибирск: Наука, 1981. 85 с

Арискин А.А., Данюшевский Л.В., Э.Г. Конников и др. Довыренский интрузивный комплекс (Северное Прибайкалье, Россия): изотопно-геохимические маркеры контаминации исходных магм и экстремальной обогащенности источника // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 3. С. 528–556.

Васюкова Е.А., Пономарчук А.В., Дорошкевич А.Г. Петролого-геохимическая характеристика и возраст пород Ыллымахского массива (Алданский щит, Южная Якутия) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 4. С. 489–507.

Владыкин Н.В., Сотникова И.А., Котов А.Б. и др. Строение, возраст и рудоносность Бурпалинского редкометального щелочного массива (Северное Прибайкалье) // Геология рудн. месторождений. 2014. Т. 56. № 4. С. 272–290.

Гонгальский Б.И., Криволуцкая Н.А., Арискин А.А., Николаев Г.С. Строение, состав и формирование Чинейского анортозит-габброноритового массива // Геохимия. 2008. № 7. С. 691–720.

Жидков А.Я. Щелочные интрузии Сынныр и Бурпала Северного Прибайкалья: Автореф. дисс. канд. ... геол.-мин. наук. Ленинград, 1956. 21 с. (Zhidkov A.Ya. Alkaline intrusions of Synnyr and Burpala in the Northern Baikal region. Cand. Geol.-Min. Sci. Leningrad, 1956. 21 p.)

Избродин И.А., Дорошкевич А.Г., Малютина А.В. и др. Геохронология пород щелочного массива Бурпала (Северное Прибайкалье): Новые U-Pb данные // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 1. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0741>

Когарко Л.Н. Обогащенные мантийные резервуары — источник крупнейших апатитовых и редкометальных месторождений // Тр. XV Международного семинара “Глубинный магматизм, его источники и плюмы”. Иркутск: ИГХ СО РАН, 2019. С. 5–22.

Котов А.Б., Владыкин Н.В., Ярмолюк В.В. и др. Пермский возраст Бурпалинского щелочного массива (Северное Прибайкалье): геодинамические

следствия // Докл. АН. 2013. Т. 453. № 3. С. 295–299. <https://doi.org/10.7868/S0869565213330165>.

Ларин А.М., Котов А.Б., Ковач В.П. и др. Граниты рапакиви Кодарского комплекса (Алданский щит): возраст, источники и тектоническое положение // Петрология. 2021. Т. 29. № 4. С. 339–364.

Мельников Н.Н. Погрешности метода двойного изотопного разбавления при изотопном анализе обыкновенного свинца // Геохимия. 2005. № 12. С. 1333–1339.

Пак А.С., Миков Н.А., Бушуев В.П. и др. Отчет о результатах геолого-поисковых работ Сольской партии за 1960–1961 гг. в бассейне р. Майгунда. Улан-Удэ, 1962. 213 с.

Портнов А.М. Редкометальная минерализация щелочного массива Бурпала в Северном Прибайкалье: Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Москва, 1965. 275 с.

Портнов А.М., Нечаева Е.А. Нефелинизация в приконтактных зонах щелочного массива Бурпала // Изв. АН СССР. Серия геол. 1967. № 5. С. 71–76.

Саватенков В.М., Рыцк Е.Ю., Великославинский С.Д., Лебедева Ю.М. Изотопные (Nd-Sr) характеристики и возможные источники ультракалиевых щелочных пород Сыньерского массива (Северное Прибайкалье) // Тр. Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 497–501.

Туркина О.М., Изох А.Э. Гетерогенная субконтинентальная литосферная мантия под южным флангом сибирского кратона: свидетельства по составу палеопротерозойских мафических ассоциаций // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 10. С. 1369–1391

Цыганков А.А., Хубанов В.Б., Бурмакина Г.Н. и др. Соотношение мантийного и разновозрастного корового вещества в составе гранитоидов Забайкалья А-типа: петрологические и геодинамические следствия // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 779–799.

Arzamastsev A.A., Bea F., Glaznev V.N. et al. Kola alkaline province in the Paleozoic: evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions // Russ. J. Earth Sci. 2001. № 3. P. 1–32.

Bogatikov O., Kononova V., Pervov V., Zhuravlev D. Petrogenesis of mesozoic potassic magmatism of the Central Aldan: a Sr-Nd isotopic and geodynamic model // Int. Geol. Rev. 1994. V. 36. № 7. P. 629–644.

Davies G.R., Stolz A.J., Mahotkin I.L. et al. Trace element and Sr-Pb-Nd-Hf isotope evidence for ancient, fluid-dominated enrichment of the source of Aldan Shield lamproites // J. Petrol. 2006. V. 47. № 6. P. 1119–1146.

Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatentkov V.M. Alkaline magmatism of the Vitim province, West Transbaikalia, Russia: Age,

mineralogical, geochemical and isotope (O, C, D, Sr and Nd) data // Lithos. 2012. V. 152. P. 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.002>

Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izokh A.E. et al. Isotopic and trace element geochemistry of the Seligdar magnesiocarbonatites (South Yakutia, Russia): Insights regarding the mantle evolution beneath the Aldan-Stanovoy shield // J. Asian Earth Sci. 2018. V. 154. P. 354–368.

Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Ponomarchuk A.V. et al. Cora Wohlgenuth-Ueberwasse Petrology and geochemistry of the late Mesozoic Dzheltula alkaline igneous complex, Aldan–Stanovoy Shield, Russia: constraints on derivation from the ancient enriched mantle source // Int. J. Earth Sci. 2020. V. 109. P. 2407–2423.

Estrade G., Béziat D., Salvi S. et al. Unusual evolution of silica-under- and oversaturated alkaline rocks in the Cenozoic Ambohimirahavy Complex (Madagascar): Mineralogical and geochemical evidence // Lithos. 2014. V. 206–207. P. 361–383.

<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.008>

Foland K.A., Landoll J.D., Henderson C.M.B., Chen J.F. Formation of cogenetic quartz and nepheline syenites // Geochim. Cosmochim. Acta. 1993. V. 57. P. 697–704.

Frost B.R., Frost C.D. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks // J. Petrol. 2008. V. 49. P. 1955–1969.

Guo Z., Wilson M., Liu J., Mao Q. Post-collisional, potassic and ultrapotassic magmatism of the Northern Tibetan Plateau: Constraints on characteristics of the mantle source, geodynamic setting and uplift mechanisms // J. Petrol. 2006. V. 47. № 6. P. 1177–1220.

Izbrodin I., Doroshkevich A., Rampilov M. et al. Late Paleozoic alkaline magmatism in Western Transbaikalia, Russia: Implications for magma sources and tectonic settings // Geosci. Front. 2020. V. 11. № 4. P. 1289–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.009>

Jahn B.M., Litvinovsky B.A., Zanzvilevich A.N., Reichow M. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: evolution, petrogenesis and tectonic significance // Lithos. 2009. V. 113. P. 521–539. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.015>

Jourdan F., Bertrand H., Schärer U. et al. Major and trace element and Sr, Nd, Hf, and Pb isotope compositions of the Karoo Large Igneous Province, Botswana–Zimbabwe: lithosphere vs mantle plume contribution // J. Petrol. 2007. V. 6. P. 1043–1077.

Kogarko L.N. Role of volatiles. Ed. H. Sørensen. The Alkaline Rocks. Chichester: John Wiley, 1974. P. 474–487.

Kramers J.D., Tolstikhin I.N. Two terrestrial lead isotope paradoxes, forward transport modelling, core formation and the history of the continental crust // Chem. Geol. 1997. V. 139. P. 75–110.

- Kramm U., Kogarko L.N. Nd and Sr isotope signatures of the Khibina and Lovozero agpaitic centres, Kola Alkaline Province, Russia // *Lithos*. 1994. V. 32. P. 225–242.
- Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M. *et al.* Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: the Late Palaeozoic post-collisional igneous province of Transbaikalia (Russia) // *Lithos*. 2011. V. 125. P. 845–874.
- Marks M.A.W., Hettmann K., Schilling J. *et al.* The mineralogical diversity of Alkaline Igneous Rocks: critical factors for the transition from miaskitic to agpaitic phase assemblages // *J. Petrol.* 2011. V. 52. № 3. P. 439–455. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq086>
- Middlemost E.A.K. Naming materials in the magma/igneous rock system // *Earth-Sci. Rev.* 1994. V. 37. № 3–4. P. 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Mikova J., Denkova P. Modified chromatographic separation scheme for Sr and Nd isotope analysis in geological silicate samples // *J. Geosci.* 2007. V. 52. P. 221–226.
- Misawa K., Yamazaki F., Ihira N., Nakamura N. Separation of rare earth elements and strontium from chondritic meteorites by miniaturized extraction chromatography for elemental and isotopic analyses // *Geochem. J.* 2000. V. 34. P. 11–21.
- Mitchell R.H., Smith C.B., Vladykin N.V. Isotopic composition of strontium and neodymium in potassic rocks of the Little Murun complex, Aldan Shield, Siberia // *Lithos*. 1994. V. 32. P. 243–248.
- O'Nions R.K., Hamilton P.J., Evensen N.M. Variations in  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in oceanic basalts // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1977. V. 34. № 1. P. 13–22.
- Ou Q., Wang Q., Wyman D. A. *et al.* Postcollisional delamination and partial melting of enriched lithospheric mantle: Evidence from Oligocene (ca. 30 Ma) potassium-rich lavas in the Gemuchaka area of the central Qiangtang Block, Tibet // *GSA Bull.* 2019. V. 131. № 7/8. P. 1385–1408. <https://doi.org/10.1130/B31911.1>
- Pankhurst R.J., Beckinsale R.D., Brooks C.K. Strontium and oxygen isotope evidence relating to the petrogenesis of the Kangerdlugssuaq alkaline intrusion, East Greenland // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1976. V. 54. P. 17–42.
- Pearce J.A., Stern R.J., Bloomer S.H., Fryer P. Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: Implications for the nature and distribution of subduction components // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2005. V. 6. № 7. Q07006. doi:10.1029/2004GC000895
- Pfander J.A., Jochum K.P., Kozakov I. *et al.* Coupled evolution of back-arc and island arc-like mafic crust in the late-Neoproterozoic Agardagh Tes-Chem ophiolite, Central Asia: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope data // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2002. V. 143. P. 154–174.
- Piishuus M.S., Peate D.W., Tegner C. *et al.* Petrogenesis of cogenetic silica-oversaturated and undersaturated syenites by periodic recharge in a crustally contaminated magma chamber: the Kangerlussuaq Intrusion, East Greenland // *J. Petrol.* 2008. V. 49. № 3. P. 493–522. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm090>
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust. Treatise on Geochemistry (Second Edition). Elsevier, 2014. P. 1–51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios in silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1990. V. 54. P. 1353–1357.
- Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 1989. V. 42. P. 313–345.
- Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Khubanov V.B., Buyantuev M.D. Geodynamics of Late Paleozoic batholith forming processes in Western Transbaikalia // *Petrology.* 2017. V. 25. № 4. P. 396–418. <https://doi.org/10.1134/S0869591117030043>
- Vladykin N.V., Sotnikova I.A. Petrology, geochemistry and source characteristics of the Burpala alkaline massif, North Baikal // *Geosci. Front.* 2017. V. 8. № 4. P. 711–719.
- Vorontsov A., Yarmolyuk V., Dril S. *et al.* Magmatism of the Devonian Altai-Sayan Rift System: Geological and geochemical evidence for diverse plume-lithosphere interactions // *Gondwana Res.* 2021. V. 89. P. 193–219.



## Petrogenesis and Sources for Rocks of the Alkaline Rare-Metal Burpala Intrusion (Northern Baikal Region)

A. G. Doroshkevich<sup>1, 2, 3, \*</sup>, V. M. Savatenkov<sup>4</sup>, A. V. Malyutina<sup>1, 2</sup>, I. A. Izbrodin<sup>1, 2</sup>,  
I. R. Prokopiev<sup>1, 2</sup>, A. E. Starikova<sup>1, 2</sup>, T. A. Radomsкая<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

<sup>3</sup>*N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

<sup>4</sup>*Institute of Geology and Geochronology of Precambrian RAS, St. Petersburg, Russia*

<sup>5</sup>*A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia*

The results of petrologic and geochemical study of rocks of the Burpala alkaline intrusion composed of quartz syenites, alkaline nepheline-free and nepheline syenites, including ore-bearing ones, which is part of the Late Paleozoic North Baikal alkaline province, are presented. The studied rocks by chemical composition belong to foid monzosyenites, foid syenites and syenites, ranging from agpaitic to miascitic varieties. Close Sr-Nd isotopic characteristics, configuration of geochemical spectra confirm the syngenetic nature of magmas from which nepheline, alkaline and quartz syenites crystallized. Negative Eu anomaly in REE spectra and rather low Mg# of rocks testify in favor of a long process of fractional crystallization of rocks from the melt of alkaline-basic composition. The isotopic and geochemical characteristics of rocks of the Burpala intrusion reflect the predominance of metasomatized lithospheric mantle in the source. The formation of the rocks of the intrusion, according to the features of the trace element and isotopic data, was complicated by assimilation of upper crustal material, which was the most possible factor that determined the genetic relationship between nepheline and quartz syenites within the intrusion.

*Keywords:* petrogenesis, quartz, alkaline and nepheline syenites, sources, Northern Baikal region