



Нугуманова Язгуль Наилевна

**ПЕТРОГЕНЕЗИС УЛЬТРАОСНОВНЫХ ЛАМПРОФИРОВ ЗИМИНСКОГО ЩЕЛОЧНО-
УЛЬТРАОСНОВНОГО КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА
(ЮГ СИБИРСКОГО КРАТОНА)**

1.6.3 Петрология, вулканология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

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

Научный руководитель: Дорoshkevich Анна Геннадьевна, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией рудоносности щелочного магматизма Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН) (г. Новосибирск).

Официальные оппоненты: Лебедева Наталия Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории петрографии имени академика А.Н. Заварицкого Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН) (г. Москва).

Толстов Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и минералогии благородных металлов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (г. Якутск).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) (г. Иркутск).

Защита состоится 6 октября 2025 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д.3.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Котлярову А.В. Тел./факс: +7 (383) 373-05-18; +7(383) 373-05-61, e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте: https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/nugumanova/dis-Nugumanova.pdf

Автореферат разослан 2 сентября 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.050.01, к.г.-м.н.



А.В. Котляров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Ультраосновные лампрофиры являются важными в понимании процессов, происходящих в мантии, а их происхождение и классификация продолжают оставаться предметом дискуссий (Chalapathi Rao et al., 2004; Tarpe et al., 2004, 2008; Gaffney et al., 2007 и многие другие). К ультраосновным лампрофирам относят породы, родственные кимберлитам, так как они тоже имеют глубинный источник вещества, недосыщены кремнеземом, обогащены магматическими карбонатами и не несут серьезных признаков контаминации коровым материалом (Foley et al., 2002; Tarpe et al., 2004; Kjarsgaard et al., 2009). Генетическая связь ультраосновных лампрофиров и кимберлитов остается предметом дискуссий. Р. Митчелл и С. Таппе (Mitchell и Tarpe, 2010) предполагают, что ультраосновные лампрофиры должны образовываться из источников, которые содержат метасоматические жилы, богатые флогопитом и карбонатами, в мантийном перидотите на границе литосферы и астеносферы. По мнению авторов, расплавы ультраосновных лампрофиров являются родоначальными для многих карбонатитовых интрузий в рифтовых зонах кратонной литосферы. Изучение карбонатитов, кальцитовых кимберлитов и ультраосновных лампрофиров западной Гренландии показало, что породы имеют генетическую связь (Pilbeam et al., 2024). Авторы считают, что для генерации ультраосновного лампрофирового расплава нужны три компонента: первичный карбонатный расплав из астеносферной мантии; гранатовый гарцбургит; ассоциации клинопироксена и флогопита. В формировании родоначальных расплавов кимберлитов также участвуют эти компоненты, однако вклад расплава из клинопироксен-флогопитовых ассоциаций незначителен и в расплаве более высокая доля гарцбургитов (Pilbeam et al., 2024).

В данной работе были изучены ультраосновные лампрофиры (айликисты) зиминского комплекса, расположенные в пределах Урикско-Ийского грабена, Восточное Присяянье (южная окраина Сибирского кратона), имеющие пространственную связь с щелочно-ультраосновными карбонатитовыми комплексами (Тагна, Белая и Средняя Зима). При этом, кимберлиты и ультраосновные лампрофиры широко распространены в пределах Восточного Присяянья (Секерин и др., 1995; Егоров и др., 2010). Их формирование происходило в мезопротерозое, неопротерозое и девоне (Егоров и др., 2010). Возраст, классификация, их генетическая связь и петрогенезис являются дискуссионными (Секерин и др., 1995; Василенко, 1996; Егоров и др., 2010; Корнаков и др., 2019; Savelyeva et al., 2020, 2022; Ashchepkov et al., 2020, Nugumanova et al., 2024), поэтому для исследований были выбраны ультраосновные лампрофиры зиминского комплекса.

Объект исследований: ультраосновные лампрофиры (айликисты) зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса.

Цель исследований: установление особенностей петрогенезиса и определение возраста ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса.

Для достижения данной цели решались следующие **основные задачи:**

1. Провести сбор, систематизацию и анализ результатов работ предшественников, посвященных геологии Восточного Присяянья и исследованию ультраосновных лампрофиров;
2. Охарактеризовать петрографический состав ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса и провести их систематику;
3. Выявить особенности состава минералов основной массы и макрокристаллов, состава полифазных включений в них;
4. Дать петролого-геохимическую и изотопную (Sr-Nd) характеристику пород, провести сравнительный анализ их составов и характера распределения в них редких и рассеянных элементов;

5. Провести геохронологические (U-Pb (LA ICP MS) и Ar-Ar) исследования ультраосновных лампрофиров и обобщить имеющиеся опубликованные данные о возрасте ультраосновных лампрофиров и пород щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов района исследований;
6. Построить модель формирования айликитовых расплавов на основе полученных минералогических и петролого-геохимических данных.

Научная новизна

Получены новые данные о составе минералов айликитов зиминского комплекса и показана возможность использования состава минералов для классификации пород, определения условий кристаллизации и характеристик мантийного источника ультраосновных лампрофиров.

Впервые найдены поликристаллические включения в оливине и изучены полифазные включения в хромите из ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса. Включения были использованы для оценки эволюции исходного айликитового расплава.

Получен возраст формирования даек ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса.

Защищаемые положения

1. Ультраосновные лампрофиры зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса по особенностям минерального состава и петрографии (наличию первичных карбонатов, клинопироксена; отсутствию нефелина, мелилита, калиевого полевого шпата) относятся к айликитам. Формирование даек айликитов происходило в интервале от 647 до 590 млн лет.
2. Минеральный и химический состав айликитов, а также зональное строение минералов свидетельствуют о процессах кристаллизационной дифференциации. Эти процессы были усложнены вовлечением продуктов кристаллизации из более ранних магматических порций.
3. Первичные расплавы ультраосновных лампрофиров обладали щелочно-карбонатно-силикатным составом и формировались из метасоматизированных гранатовых перидотитов с флогопит-клинопироксеновыми и карбонатными ассоциациями. Эти расплавы демонстрируют изотопно-геохимические характеристики, сходные с породами неопротерозойских щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов южной части Сибирского кратона. В их источнике преобладал изотопно-деплетированный компонент.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные данные несут значимую информацию о генерации и эволюции ультраосновных лампрофировых расплавов, а также о составе литосферной мантии и мантийных метасоматических процессах.

Полученные результаты могут быть важными в разработке критериев для поисков ультраосновных лампрофиров и оценке их алмазоносности.

Фактический материал и методы исследования

Образцы ультраосновных лампрофиров были отобраны в ходе полевых работ в 2013 и 2021 годах. Из образцов изготовлены полированные и неполированные шлифы для анализа оптическими методами. Состав минералов и включений определялся с помощью электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU, электронного микрозонда JEOL JXA-8230, КР-спектроскопии на спектрометре LabRAM HR800 фирмы Horiba Jobin Yvon (ИГМ СО РАН). Геохимические исследования оливинов выполнены в Институте неорганической химии СО РАН в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) с использованием спектрометра iCAP Qc (Thermo Scientific) и устройства лазерного пробоотбора NWR 213 (ESI).

U-Pb определение возраста перовскита с помощью LA-ICP-MS и анализ микроэлементов проводились синхронно в лаборатории лазерного микрозондового анализа минералов (Milma Lab) Китайского университета геонаук, Пекин (CUGB), Китай. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование производилось на масс-спектрометре NG 5400 (ИГМ СО РАН). Валовый состав пород определялся методом РФА на спектрометре ARL 9900XP (Termo Fisher Scientific). Содержания микроэлементов в породах были определены методом ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (Finnigan Mat) с ультразвуковым распылителем U-5000AT+ (ИГМ СО РАН). Sr-Nd изотопные исследования в породах 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).

Апробация работы и публикации

Основные результаты обсуждались и докладывались на XXVI международном научном симпозиуме им. Ак. М.А. Усова студентов и молодых ученых (Томск, 2022), XIX Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН (Апатиты, 2022), X Международной Сибирской конференции молодых ученых-геологов (Новосибирск, 2022), XIV Межрегиональной научно-практической конференции «Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий» (Уфа, 2022, 2023), XIX Всероссийской конференции по термобарогеохимии (Новосибирск, 2022).

По результатам проведенных исследований было опубликовано 5 статей в рецензируемых научных журналах по списку ВАК.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключался в подготовке образцов для аналитических работ. Автором проведены анализ публикаций, выбор методик исследования, а также выполнены аналитические работы по изучению состава минералов и включений в них. Проведен анализ и интерпретация полученных данных и сопоставление с известными результатами изучения ультраосновных комплексов.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения. Объем работы составляет 140 страниц, 56 рисунка и 13 таблиц.

Благодарности

Автор работы выражает огромную благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. Анне Геннадьевне Дорошкевич за чуткое руководство и наставничество. Автор искренне благодарит к.г.-м.н. А.Е. Старикову, м.н.с. А.Д. Калугину, к.г.-м.н. И.Р. Прокопьева, к.г.-м.н. И.А. Избродина, к.г.-м.н. Д.А. Чеботарева и весь коллектив лаборатории рудоносности щелочного магматизма (№215) за всестороннюю помощь в выполнении работы. Также автор благодарит сотрудников лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН Н.С. Карманова, М.В. Хлестова, В.А. Даниловскую, Е.Н. Нигматулину за высокий профессионализм и помощь в проведении аналитических исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность, цели и задачи исследования. Первая глава посвящена истории изучения зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса и общим сведениям о состоянии проблемы в изучении ультраосновных лампрофиров. Во второй главе перечислены методы, использованные при минералогическом, геохронологическом, петролого-геохимическом и изотопно-геохимическом изучении пород. В третьей главе приведена краткая геологическая характеристика зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса. В четвертой главе дана петрографическая характеристика ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса. В пятой главе приведены данные по U-Pb возрасту перовскита и Ar/Ar возрасту флогопита из 6 даек ультраосновных лампрофиров. В шестой главе подробно описаны составы минералов ультраосновных лампрофиров и обсуждается использование их составов как индикаторов условий кристаллизации для характеристик мантийного источника и классификации кимберлитоподобных пород. В седьмой

главе рассматриваются петролого-геохимическая и изотопно-геохимическая характеристики ультраосновных лампрофиров и обсуждается петрогенезис родительской магмы айликитов зиминского комплекса.

Геологическая характеристика зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса

Массивы зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса расположены в пределах Урикско-Ийского грабена, который находится на южной окраине Сибирского кратона. Грабен представляет собой палеоавлакоген и сложен вулканогенно-осадочными отложениями раннего протерозоя и мезозоя (Gladkochub et al., 2014). Массивы ультраосновных щелочных пород и карбонатитов приурочены к зоне растяжения литосферы. Породы зиминского комплекса имеют неопротерозойский возраст, в его состав входят породы Большетагнинского, Белозиминского, Среднезиминского массивов, Ярминского рудопоявления, а также большое количество даек и трубок ультраосновных лампрофиров, образующих дайковые поля и пояса (Василенко, 1993) (рис.1).

Ультраосновные лампрофиры Большетагнинского массива составляют серию круто падающих дуговидных даек, мощностью от десятков сантиметров до 20 м, протяженность до нескольких сотен метров. По данным А.А. Василенко (Василенко, 1993) среди даек выделяется две возрастные группы: 1) докарбонатитовые, прорывающие ийолиты и сиениты; 2) посткарбонатитовые, образовавшиеся после формирования флюоритовых метасоматитов. Докарбонатитовые дайки сильно изменены. Первичная порода устанавливается лишь по сохранившейся порфировой структуре и секущим вмещающие породы контактам (Василенко, 1993).

Трубка Южная расположена в 15 км к юго-западу от Белозиминского массива и представлена ультраосновным лампрофиром. Породы трубки прорывают сланцы и песчаники далдарминской свиты. Трубка имеет форму овала размером 350×270 м. Выполнена она грубообломочной брекчией голубовато-серого цвета, состоящей из сланцев, роговиков, долеритов, сиенитов, пироксенитов, серпентинитов, пикритов и карбонатных пород. Обломки составляют 5–30 %, размер их – от нескольких миллиметров до 20 см. Обломки сцементированы айликидом, имеющим порфировую структуру (Корнаков и др., 2019; Ashchepkov et al., 2020; Шарыгин, 2023).

Ярминское рудопоявление (ферриторита, торита, ксенотима), включающее Бушканайскую дайку, расположено среди пород ингашинской свиты и находится юго-западнее Большетагнинского массива. Бушканайская дайка прорывает песчано-сланцевые отложения ингашинской свиты и находится в правом борту р. Ярмы. Мощность дайки составляет около 2 метров. Бушканайская дайка представляет собой сложное тело с тремя разновидностями пород, отвечающие трем фазам внедрения (Минаева и Егоров, 2008). Самая ранняя фаза сложена на 65–70 об. % зернами серпентинизированного оливина и основной массой, представленной флогопитом, кальцитом, серпентином, серпентинизированным оливином II генерации, шпинелидами, апатитом, гидрогранатом. Породы второй фазы представлена вкрапленниками оливина (20–25 об. %) и флогопита (3–5 об. %) и основной массой с гидрогранатом, клинопироксеном, флогопитом, шпинелидами, серпентинизированным оливином. Породы третьей фазы более богата слюдой и клинопироксеном (Минаева и Егоров, 2008; Савельева и др., 2020).

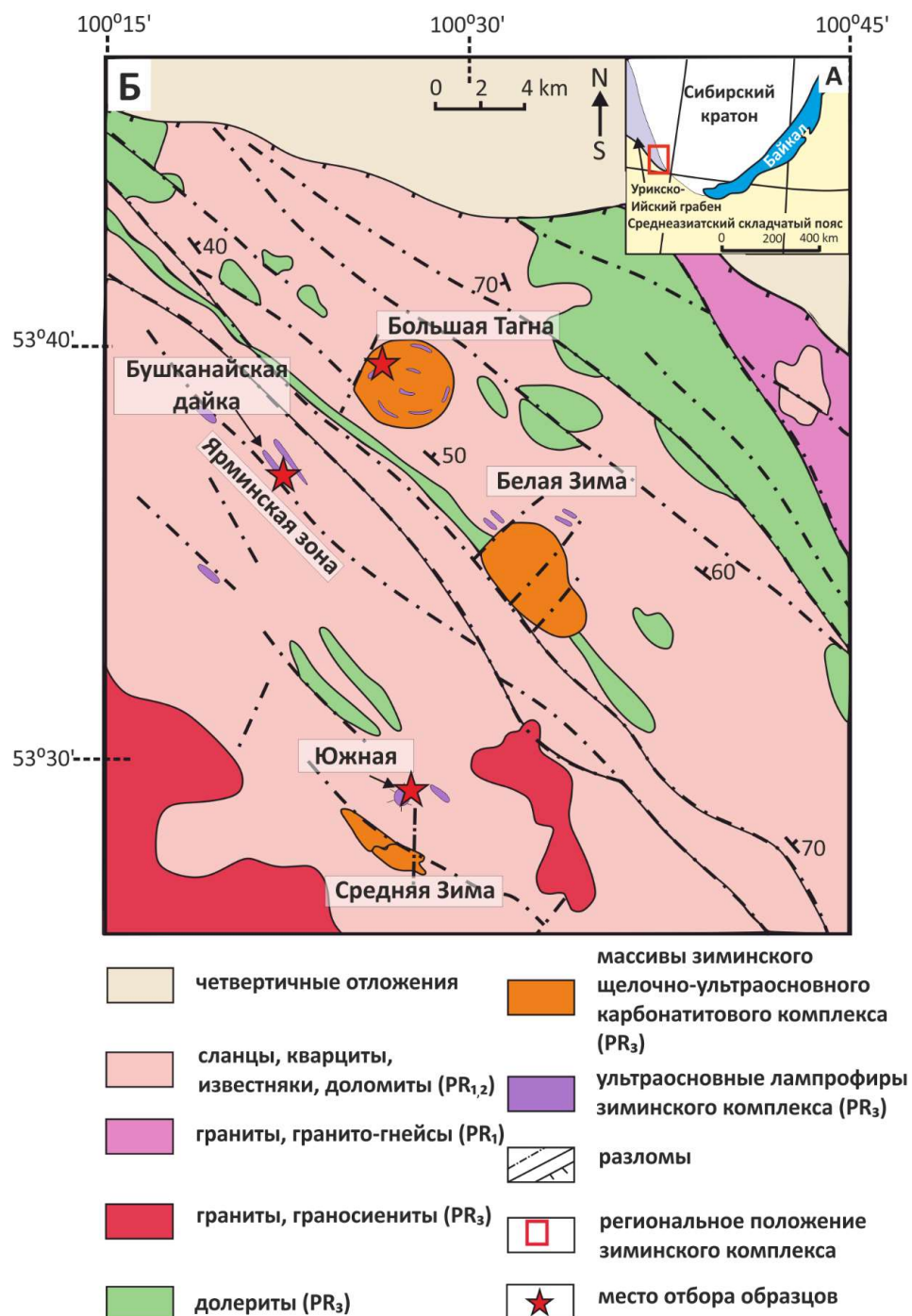


Рисунок 1. Схема распространения пород зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса, расположенного в южной окраине Сибирского кратона, измененная после (Фролов и Белов, 1999). Единицы в легенде расположены в хронологическом порядке. PR₁-ранний протерозой, PR₂-средний протерозой, PR₃-поздний протерозой.

Петрографическая характеристика ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса

Изученные образцы ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса (дайки Большетагинского массива, Бушканайская дайка и трубка Южная) обладают порфировидной структурой, массивной текстурой (рис. 2,3). Они состоят из макрокристов оливина и полностью раскристаллизованной тонкозернистой основной массы. Содержание макрокристов варьирует в пределах 30-50 об. %. Породы из трубки Южная имеют брекчиевую текстуру и содержат не только обломки различных по составу пород, но и макрокристы оливина, амфибола, магнетита, флогопита, клинопироксена. В образце из трубки Южная изучалась только основная масса.

Оливин во всех изученных образцах даек, кроме образца из Бушканайской дайки, полностью замещен серпентином и/или тальком (рис.2,3). Основная масса пород представлена шпинелидами, перовскитом, флогопитом, минералами группы апатита и граната, карбонатами и сульфидами.

Большинство изученных айликитов изменилось на позднемагматической или гидротермальной стадии. Это выражается в серпентинизации оливина и хлоритизации флогопита. В кристаллах перовскита из айликитов Большетагнинского массива появляются микропрожилки рутила (рис.2).

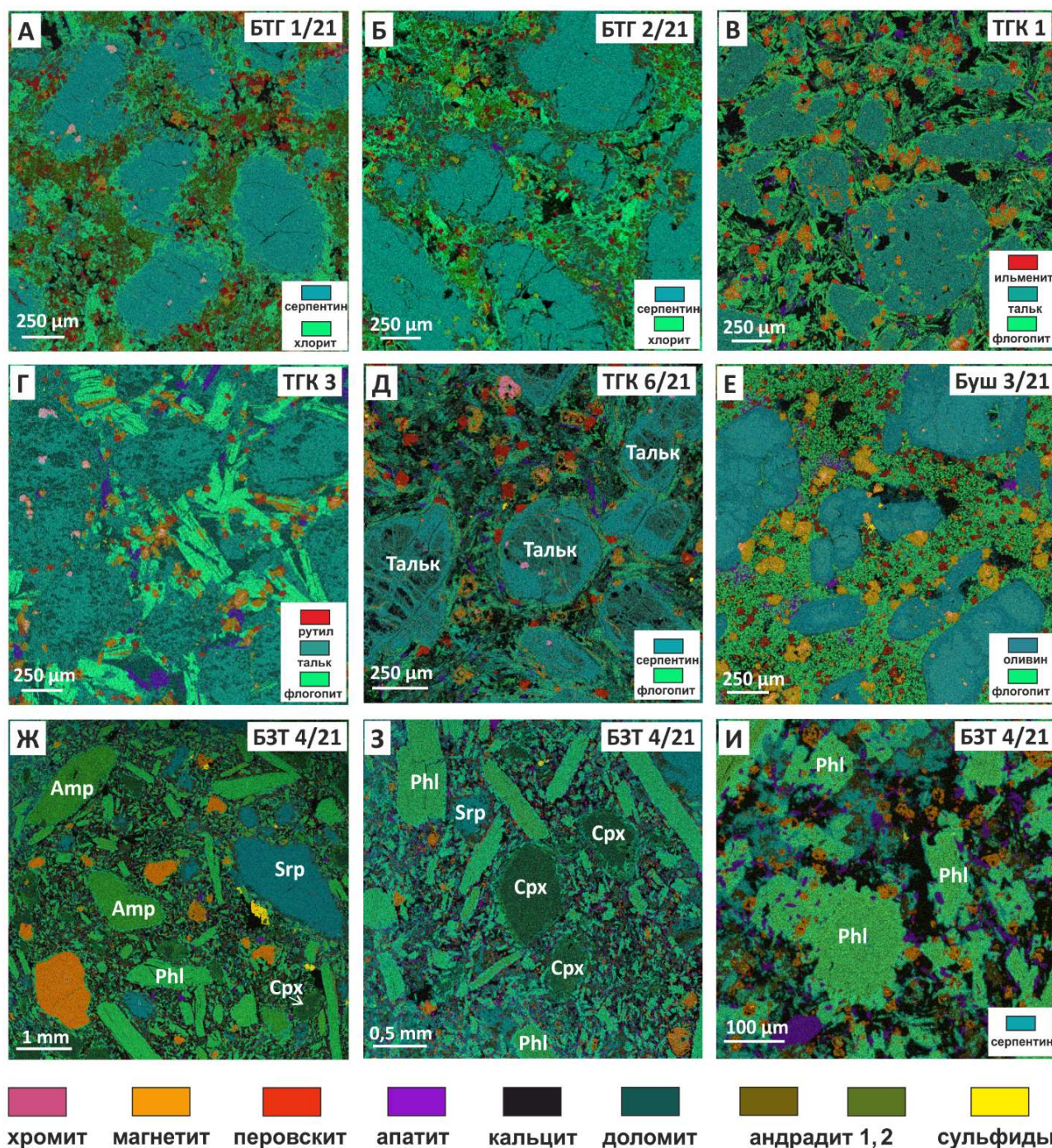


Рисунок 2. Многослойные элементные карты для ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса. Образцы БТГ 1/21, БТГ 2/21, ТГК 1, ТГК 3, ТГК 6/21 отобраны из даек Большетагнинского массива, Буш 3/21 из Бушканайской дайки, БЗТ 4/21 из трубки Южная.

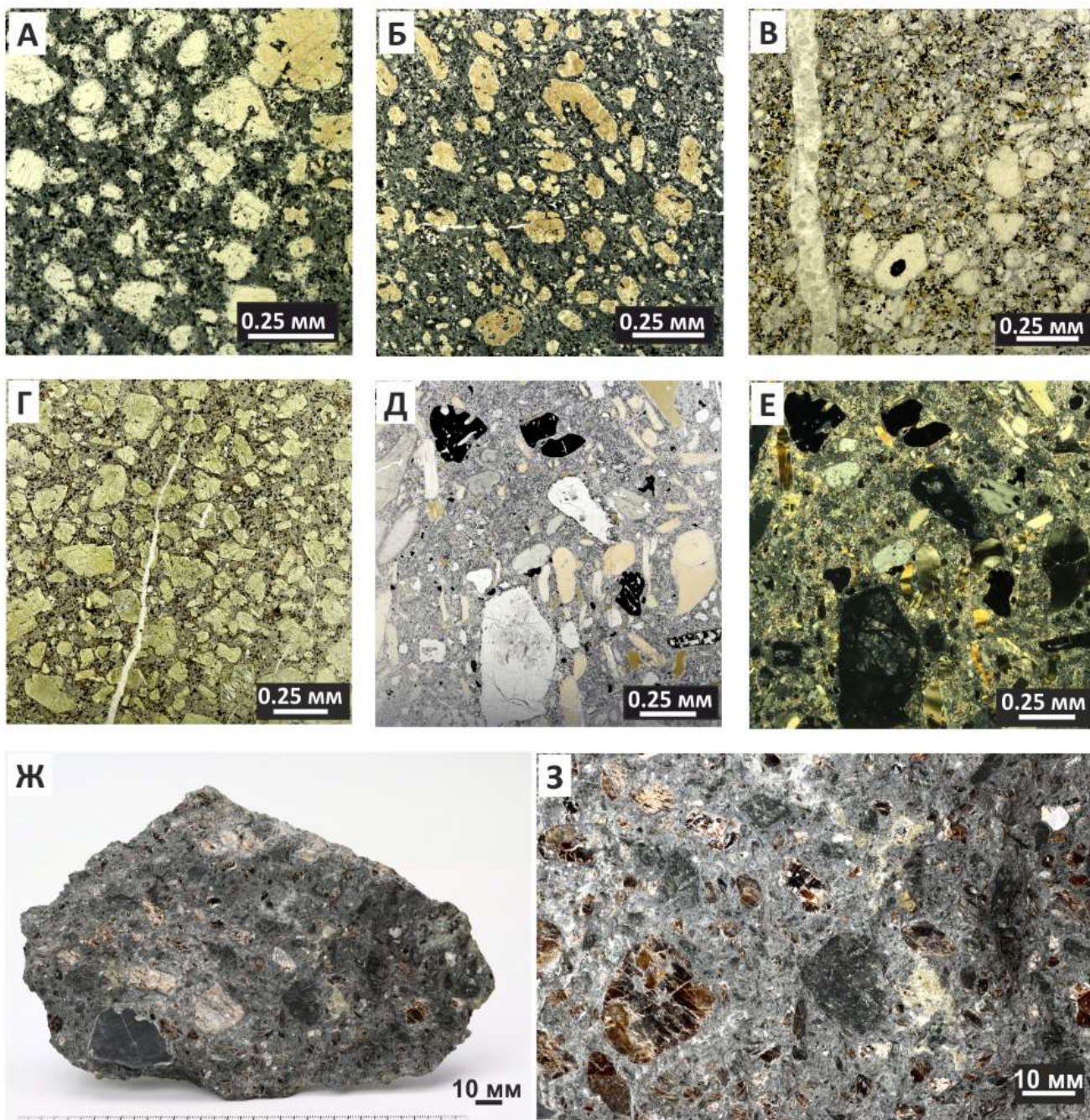


Рисунок 3. Фотографии шлифов из даек Большетагинского массива (А – БТГ 1/21, Б – БТГ 2/21, В – ТГК 3, Г – ТГК 6/21), трубки Южная (Д, Е – БЗТ 4/21) и макро-образца из трубки Южная (Ж, 3). А-Д – николи II, Е – николи X.

Минералогическая характеристика ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса

Кристаллы оливина из айликитов Бушканайской дайки зональные и содержат ядра. По составу ядер было выделено 2 типа кристаллов оливина: оливин с высокожелезистым и с высокомагнезиальным ядром. Кристаллы оливина с нормальной зональностью имеют ядро с относительно высокими $Mg\#$ 86-89 и NiO , низкими CaO и MnO . Каймы этих оливинов относительно ядер обогащены FeO , CaO , MnO и обеднены NiO . Кристаллы оливина с обратной зональностью характеризуются ядром, обогащенным FeO , и высокомагнезиальной каймой. Высокожелезистые ядра имеют относительно низкие $Mg\#$ (82-86) и NiO , высокое MnO .

Содержание СаО в ядрах и каймах примерно одинаковое 0.15-0.18 мас.%. Состав кайм оливина с обратной зональностью похож на состав ядер оливина с нормальной зональностью.

Поликристаллические включения в оливине из ультраосновных лампрофиров Бушканайской дайки представлены крупными (50-300 мкм) полностью раскристаллизованными образованиями. Они имеют четкие границы с оливином. Во включениях основными фазами являются клинопироксен и флогопит, а также встречаются магнетит, кальцит, ильменит. Клинопироксен представлен зернами от идиоморфных до ксеноморфных, размером 50-150 мкм. Магнезиальность в них варьирует в пределах 60-80, TiO_2 до 9.02 мас. %, Al_2O_3 до 9.09 мас. %, MnO до 0.5 мас. %, Na_2O до 1 мас. %. Зерна клинопироксена из включений имеют относительно более крупный размер (до 150 мкм), чем минерал основной массы изученных айликитов (до 25 мкм). Флогопит из включений представлен таблитчатыми зональными кристаллами размером 50-100 мкм. Содержание Al_2O_3 в ядрах составляет в среднем 12.6 мас. %, TiO_2 – 1.23 мас. %, FeO – 7.53 мас. %, MgO – 23.5 мас. %, BaO – 1.03 мас. %. От центра к краю зерна наблюдается увеличение содержания Al_2O_3 , FeO , TiO_2 и уменьшение MgO , BaO . Стоит отметить, что флогопит из включений характеризуется более крупными кристаллами (до 100 мкм) по сравнению с минералом основной массы (до 25 мкм).

Кристаллы шпинелидов из ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса зональные и по составу было выделено несколько типов: хромиты (Chr), алюмохромиты (Al-Chr), алюмомагнетиты (Al-Mgt), хромистые магнетиты (Cr-Mgt), титаномагнетиты (Ti-Mgt), магнетиты (Mgt). Ядра кристаллов, в основном, представлены хромитом с высоким содержанием Cr_2O_3 , до 45.5 мас. %. Хромитовые ядра обрастают Al-хромитом с относительно высоким содержанием Al_2O_3 до 20.9 мас. % и MgO до 15.1 мас. %. Al-хромит окружен Al-магнетитом, в котором наблюдается уменьшение концентрации Cr_2O_3 , Al_2O_3 , MgO и увеличение TiO_2 . Al-магнетит характеризуется относительно высоким содержанием MnO до 10.2 мас. %. Состав Al-магнетита постепенно переходит в Ti-магнетитовый. Магнетит обычно окружает Al-магнетит, либо титаномагнетит, а также встречается в виде субидиоморфных гомогенных зерен с содержанием Cr_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , MgO ниже 1 мас. %.

В хромитах обнаружены единичные полифазные включения размером до 15 мкм, и из них отобраны включения, имеющие небольшие размеры до 5 мкм, схожий выдержанный состав и отрицательные формы. Эти включения были идентифицированы как первичные расплавные. Основными дочерними фазами включений являются флогопит (40-60 об. %) и кальцит (10-60 об. %), кроме того встречаются диопсид (до 10 об. %), амфибол (роговая обманка) (до 10 об. %), Na-Ca-карбонаты (до 10 об. %), апатит (до 5 об. %), Fe-Ni сульфиды. Были обнаружены единичные находки Sr-REE недиагностированных фаз.

Изученные кристаллы перовскита в BSE-изображениях характеризуются как слабовыраженной зональностью (ядро+кайма), так и сложной осцилляционной зональностью. Кристаллы перовскита образуют два тренда изменения состава, однако центральная часть всех зерен имеет схожий состав. При увеличении содержания СаО в кристаллах перовскита из даек массива Большая Тагна наблюдается уменьшение содержания Na_2O , P_2O_5 , Nb_2O_5 и увеличение SrO . Составы перовскита из дайки Бушканай образуют отличающийся тренд. В них от центра к краю зерна прослеживается уменьшение содержания СаО и увеличение Na_2O , P_2O_5 , Nb_2O_5 .

В изученных образцах флогопит основной массы имеет таблитчатые зональные чешуйки, размер и состав зерен флогопита сильно варьирует. Флогопит, в основном, представлен зернами с обратной зональностью, где ядра сложены высокоглиноземистым флогопитом с содержанием Al_2O_3 (14-18 мас.%), FeO (7-18 мас.%), TiO_2 (3-6 мас.%). Флогопит с содержанием Al_2O_3 (10-14 мас.%), FeO (4-10 мас.%), TiO_2 (1-2 мас.%) обрастает высокоглиноземистый флогопит и эволюционирует до тетраферрифлогопита.

Минералы группы апатита из айликитов зиминского комплекса по составу образуют две группы. Минералы из айликитов Большетагнинского массива и трубки Южная по содержанию SrO , P_2O_5 , SiO_2 имеют схожий уровень концентраций элементов, однако апатиты из Бушканайской дайки отличаются своим составом, имея относительно высокие концентрации SrO , P_2O_5 , и низкие SiO_2 , СаО. Кроме того, для апатитов из Бушканайской дайки характерно самое

высокое содержание Na_2O до 1 мас. % и F – 3.01-3.51 мас. %. Минералы из айликов Большетагнинского массива отличаются наличием в их составе SO_4 до 0.30 мас.%. Отношение Ca/P для минералов группы апатита с идеальной формулой должно быть 1.667, что характерно только для апатитов из айликов трубки Южная. В других образцах это значение выше, вероятно, связанное с относительно низким содержанием P_2O_5 .

Минералы группы граната были обнаружены в айликах Большетагнинского массива и трубки Южная. Состав минералов группы граната, представленных губчатыми кристаллами, из айликов Большетагнинского массива (BTG 1/21 и BTG 2/2) не удалось определить из-за их плохой сохранности. Минералы, заполняющие межзерновое пространство, из айликов Большетагнинского массива и трубки Южная представлены низкотитанистым андрадитом, который содержит Al_2O_3 до 5 мас. %, MgO до 2 мас. %.

По морфологии было выделено 3 разновидности карбонатов в породах: интерстициальные карбонаты основной массы, в микропрожилках и зональные идиоморфные зерна. Эти карбонаты отличаются друг от друга не только формой, но и составом. Состав кальцитов из основной массы изученных айликов характеризуется невысоким содержанием MgO до 2 мас. %, FeO до 1 мас. %, SrO до 1.5 мас. %, MnO до 0.2 мас. %, содержание PЗЭ и BaO ниже предела обнаружения. Кальцит из микропрожилков имеет более высокое содержание MgO до 3 мас. %, FeO до 3 мас. %, SrO до 2.5 мас. %, MnO до 0.5 мас. % относительно кальцита основной массы. Доломит из TKG 3 (Большетагнинский массив) представлен зональными идиоморфными зернами, где от центра к краю понижается концентрация FeO (от 9 до 5 мас. %), SrO (от 0.3 до 0.1 мас. %) и повышается MnO (от 0.4 до 1 мас. %) и MgO (от 16 до 18 мас. %).

Барит и пирит являются типичными акцессорными минералами основной массы изученных пород. Барит содержит SrO до 7 мас. %, CaO до 1 мас. %, P_2O_5 до 2 мас. %. В образце TKG 3 (Большетагнинский массив) кроме барита и пирита был идентифицирован целестин. В основной массе айликов трубки Южная (BZT 4/21) обнаружен пентландит с содержанием NiO до 38.2 мас. %.

Петролого-геохимическая и изотопно-геохимическая (Sr-Nd) характеристика ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса

Изученные ультраосновные лампрофиров зиминского комплекса являются низкокремнеземистыми породами с содержанием SiO_2 от 28 до 31 мас. %, сумма $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 0.16-4.19$ мас.%. Это калиевые породы, с $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ отношением = 0.04-0.26. Изученные породы относятся к миаскитовым, с отношением $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.04-0.7$. Магнезиальность пород (Mg#) варьирует от 66 до 75. Айлики из Бушканайской дайки отличаются самыми высокими содержаниями TiO_2 и MgO , и низкими CaO относительно айликов Большетагнинского массива и трубки Южная, что обусловлено более высоким модалным содержанием Ti-магнетита и неизмененного оливина, низким - карбонатов по сравнению с образцами других даек. Основная масса айликов из трубки Южная характеризуется самыми высокими концентрациями Al_2O_3 , CaO, P_2O_5 и низкими TiO_2 , MnO .

На спайдер-диаграммах с нормированием к примитивной мантии (рис. 4), показано распределение редкоземельных и редких элементов в изученных породах. Изученные айлики обогащены легкими PЗЭ и относительно обеднены тяжелым PЗЭ, с $\text{La}/\text{Yb}_{\text{CN}}$ $\text{Gd}/\text{Yb}_{\text{CN}}$ отношениями равными – 32-61 и 4-10, соответственно. Eu аномалия не наблюдается (рис. 4). Для составов характерны сильное обогащение LILE, относительные Pb, Sr, Zr-Hf минимумы. Изученные породы имеют схожие мультиэлементные спектры, однако образец из Бушканайской дайки отличается более высокими концентрациями Ba, Th, легких PЗЭ.

Проведено сопоставление содержаний PЗЭ и редких элементов изученных айликов с составами мельтейгитов массива Белая Зима. Конфигурация графиков для мельтейгитов, в целом, схожа с таковой изученных айликов (рис. 4), свидетельствуя об их генетическом родстве. Однако мельтейгиты имеют несколько более низкие концентрации Ba, Rb и более

высокие Nb, Ta по сравнению с айликами. По сравнению неопротерозойскими айликами Айлик Бэй и Арбарастаха изученные образцы имеют очень схожие мультиэлементные спектры содержаний РЗЭ и редких элементов (рис. 4) (Tappe et al., 2006; Doroshkevich et al., 2023).

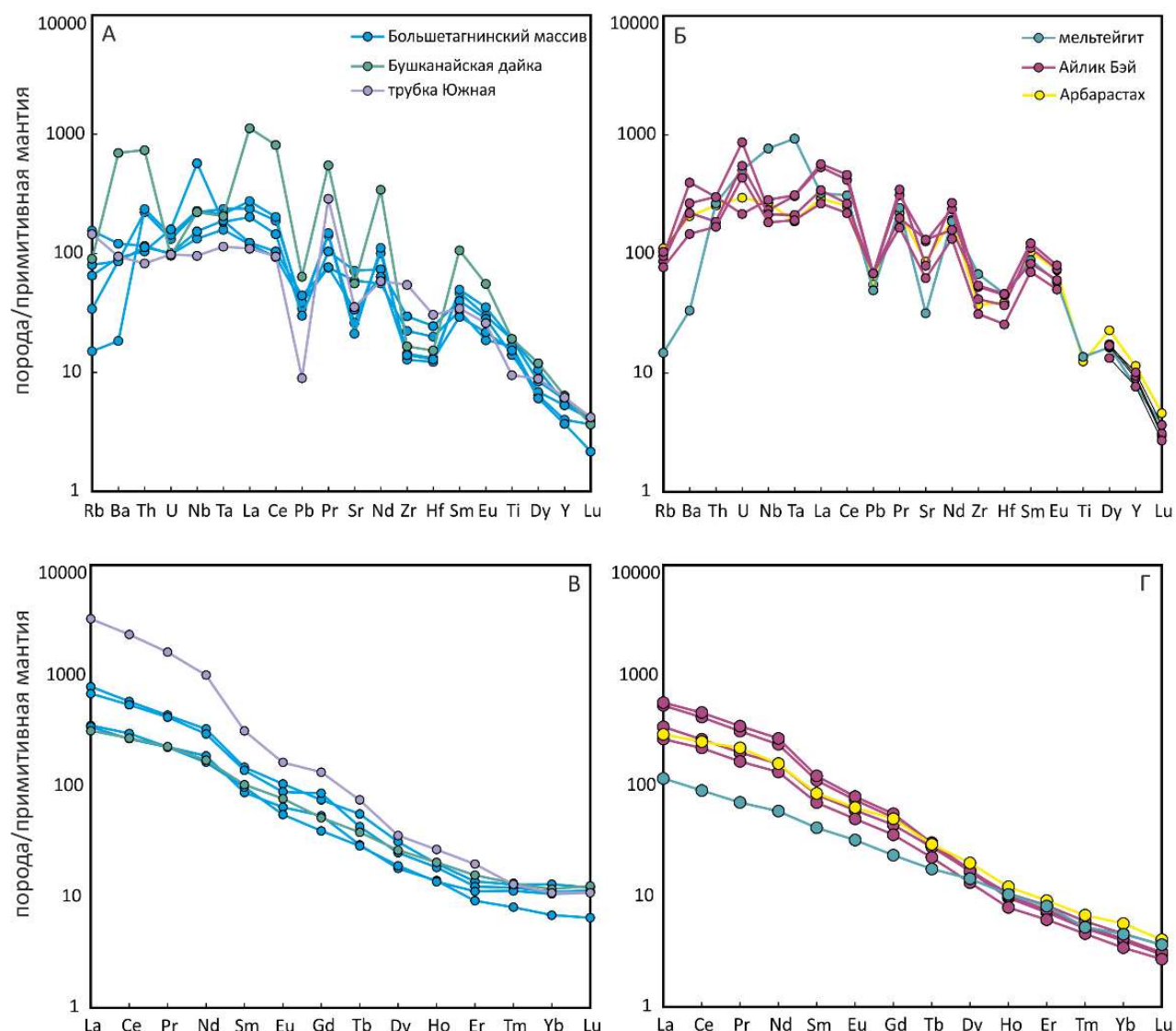


Рисунок 4. Графики конфигурации редких (а) и редкоземельных (б) элементов, нормированные к примитивной мантии, соответственно, по (Sun and McDonough, 1989). Данные по средним составам айликов Арбарастаха и Айлик Бэй, мельтейгитов зиминского комплекса взяты из (Doroshkevich et al., 2023; Tappe et al., 2006; Doroshkevich et al., 2017; Хромова, 2020).

Данные по Sr и Nd изотопному составу для ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса приведены на Рисунке 5. Первичные Sr и Nd изотопные отношения для пород были пересчитаны, исходя из возраста 645 млн лет. Рассчитанные значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (I) варьируют от 0.702784 до 0.704122, а $\epsilon\text{Nd}(t)$ от +3.9 до +5.2. На рисунке 5 показан график зависимости $\epsilon\text{Nd}(t)$ от $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (I) для айликов зиминского комплекса и нанесены значения для пород неопротерозойских щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов юго-западной и южной окраин Сибирского кратона: Белая Зима, Средняя Зима, Арбарастах, Татарский (Morikiyo et al., 2000; Владыкин и др., 2005; Врублевский и др., 2012; Хромова и др., 2020; Doroshkevich et al., 2024), а также для одновозрастных айликов Гренландии (Nelson, 1989; Tappe et al., 2006). Значения для всех комплексов попадают в квадрант диаграммы, обедненный Sr и обогащенный Nd, типичный для деплетированного мантийного источника. При этом ультраосновные

лампрофиры при схожих значениях $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ характеризуются большим разбросом $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (I)$ по сравнению с породами щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов.

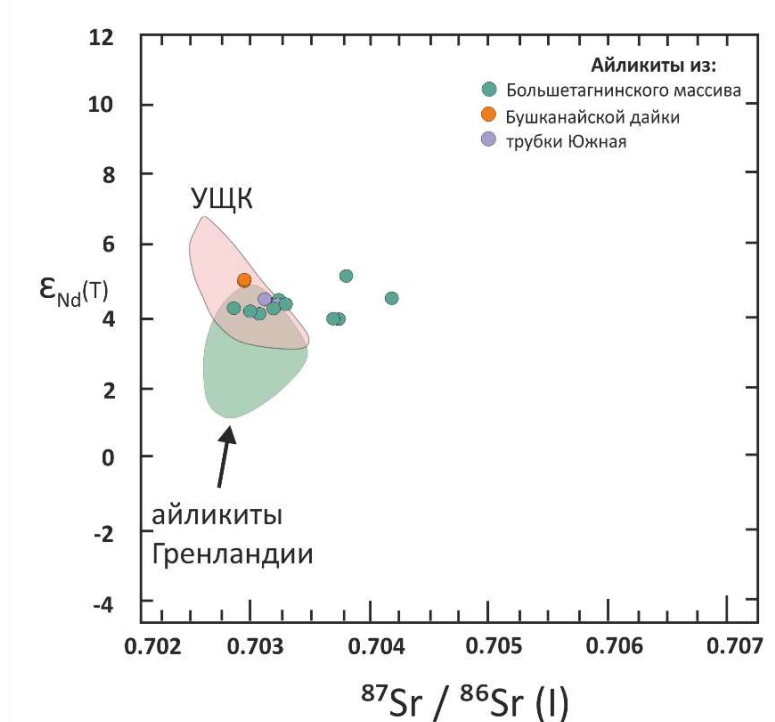


Рисунок 5. Соотношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (I)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ для айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса. УЩК – породы неопротерозойских щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов, юго-западной и южной окраин Сибирского кратона (Morikiyo et al., 2000; Владыкин и др., 2005; Врублевский и др., 2012; Хромова и др., 2020; Doroshkevich et al., 2024). Составы для айликитов и щелочно-ультраосновных пород Арбарастаха и айликитов Гренландии нанесены по (Doroshkevich et al., 2024; Tappe et al., 2006).

Возраст

Был получен возраст флогопита и перовскита из даек Большетагнинского массива, Бушканайской дайки и трубки взрыва Южная, для уточнения времени формирования пород, поскольку ультраосновные лампрофиры Большетагнинского массива были сформированы как в докарбонатитовый, так и в посткарбонатитовый этапы (Фролов и Белов, 1999), а в трубке Южная ранее датировались только макрокристы (Ashcherkov et al., 2020), сформированные за счет метасоматического воздействия проторасплава на мантийный перидотит (Возняк и др., 2024).

Возраст перовскита, полученный U–Pb методом, из айликитов Большетагнинского массива соответствует 647 ± 13 млн. лет, 644 ± 15 млн. лет, 638 ± 24 млн. лет, для айликитов Бушканайской дайки – 591 ± 33 млн. лет. Возраст флогопита, определенный $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом, для айликитов Большетагнинского массива составил 635 ± 7 млн. лет, для айликитов трубки Южная - 647 ± 7 млн. лет.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение: Ультраосновные лампрофиры зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса по особенностям минерального состава и петрографии (наличию первичных карбонатов, клинопироксена; отсутствию нефелина, мелилита, калиевого полевого шпата) относятся к айликитам. Формирование даек айликитов происходило в интервале от 647 до 590 млн лет.

По классификации (Tappe et al., 2005), изученные породы можно отнести к ультраосновным лампрофирам. Они не являются кимберлитами из-за наличия в их основной массе клинопироксена и отсутствия высокохромистых хромитов. Отсутствие мелилита не позволяет идентифицировать породы как альнэиты. Из-за отсутствия нефелина или калиевого полевого шпата породы нельзя назвать польценитом или дамтернитом. Поскольку они содержат первичные карбонаты в основной массе, то они классифицируются как айлики.

Кроме того, составы оливина (рис.6), минералов группы шпинели (рис.7) и перовскита (рис.8) изученных ультраосновных лампрофиров попадают в поле составов минералов айликов мира.

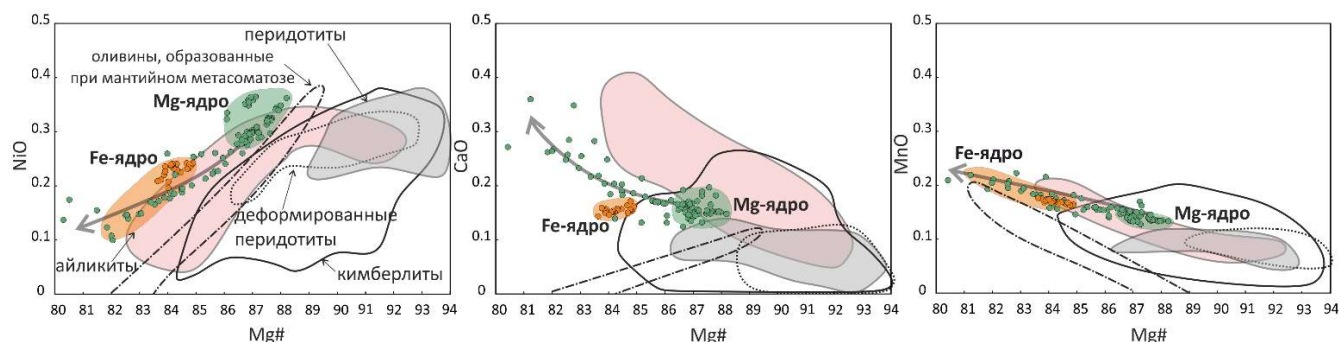


Рисунок 6. Бинарные диаграммы зависимости NiO, CaO и MnO от Mg# состава богатых железом и магнием ядер и кайм оливина из айликов дайки Бушканай. Данные по оливину из айликов и кимберлитов были взяты из работ (Veter et al., 2017) и (Giuliani, 2018), по оливину в перидотитах — из работ (Giuliani, 2018). Составы оливина, образованные при мантийном метасоматозе, нанесены по (Soltys et al., 2020).

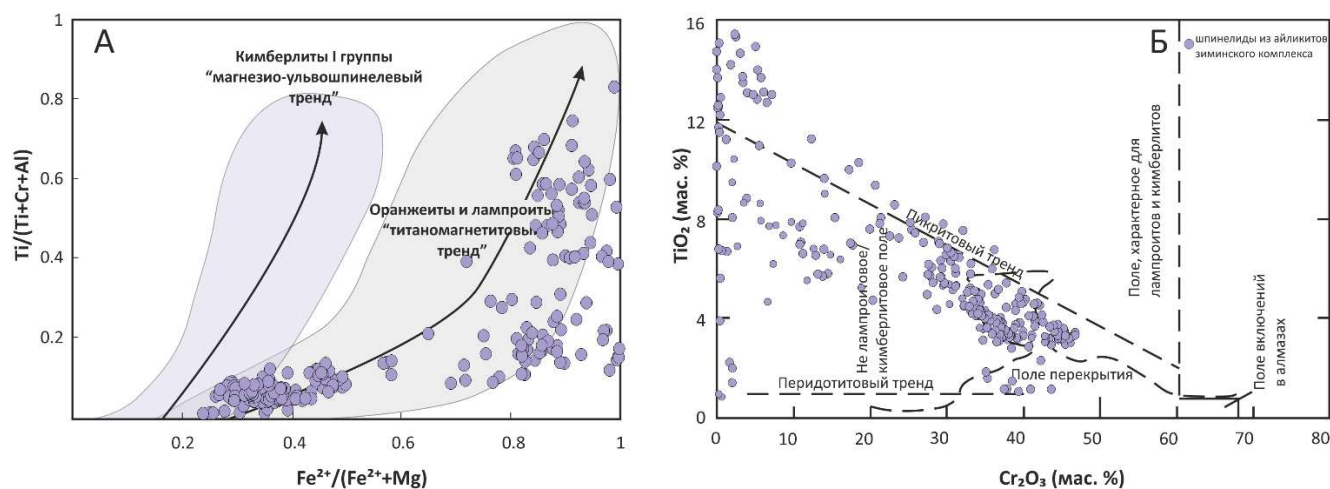


Рисунок 7. Классификационные диаграммы для минералов группы шпинели: А - Mitchell, 1995; Б - Соболев, 1974; Chalapathi Rao et al., 2012.

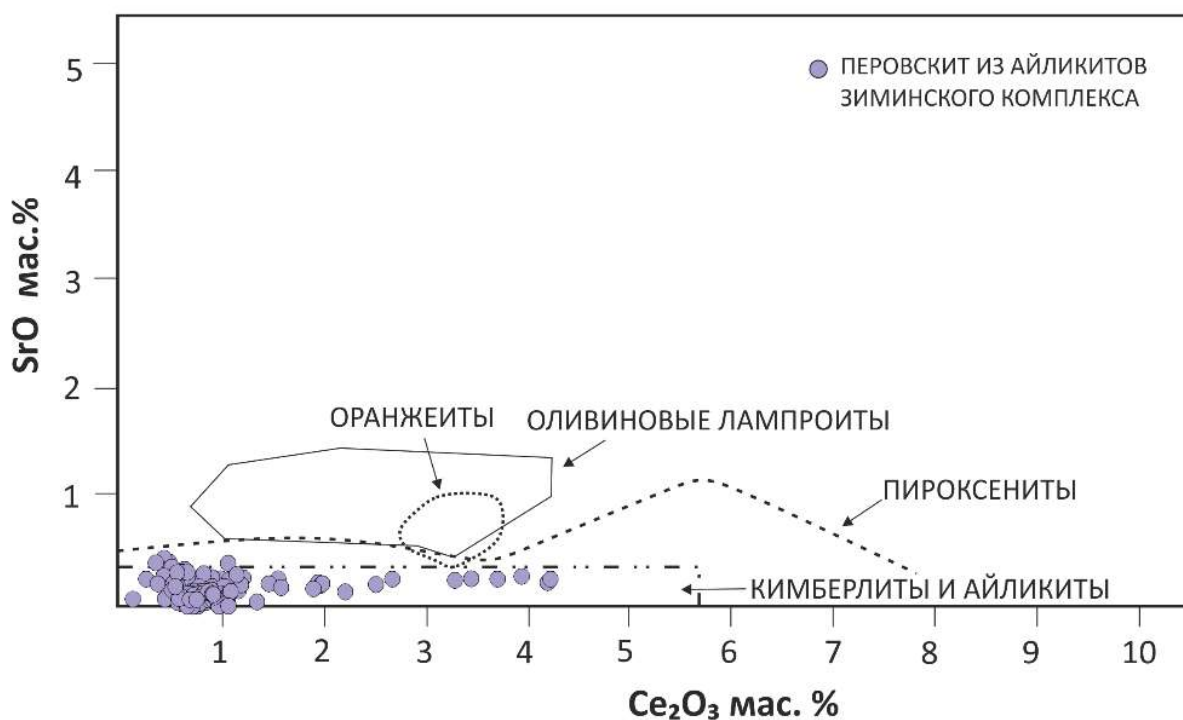


Рисунок 8. Изменение содержания Ce_2O_3 по отношению к SrO (мас. %) в перовскитах из оранжеитов, лампроитов, кимберлитов, айликитов, пироксенитов (Mitchell and Steele, 1992; Mitchell, 1995; Каргин и др., 2017; Nugumanova et al., 2024) и из айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса.

Полученные в рамках данной работы возраста хорошо согласуются в пределах ошибки с опубликованными значениями возраста образования других даек ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса, пород Большетагнинского массива и трубки Южная, так же как и других щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов (Белая Зима, Арбарастах, Ингили, Жидой) в пределах южной части Сибирского кратона (рис.9). Анализируя все опубликованные и полученные в данном исследовании геохронологические данные можно, в целом, сказать, что ультраосновные лампрофиры формируются как синхронно с породами щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов, так и завершают этап становления интрузий.

Считается, что формирование низкой степени частичного плавления глубинных щелочных карбонатитовых расплавов не требует избыточного мантийного тепла. Некоторые авторы (Moore et al., 2008; Jelsma et al., 2009; Chalapathi Rao et al., 2013; Tappe et al., 2017; Doroshkevich et al., 2022) предположили, что движение плит во время раскола континентов может быть одним из наиболее важных факторов для подъема щелочных расплавов из конвективной верхней мантии. Внутриконтинентальное растяжение и процесс распада суперконтинента Родинии в неопротерозое являлось причиной проявления щелочного магматизма в южной части Сибирского кратона (Ярмолук и др., 2005).

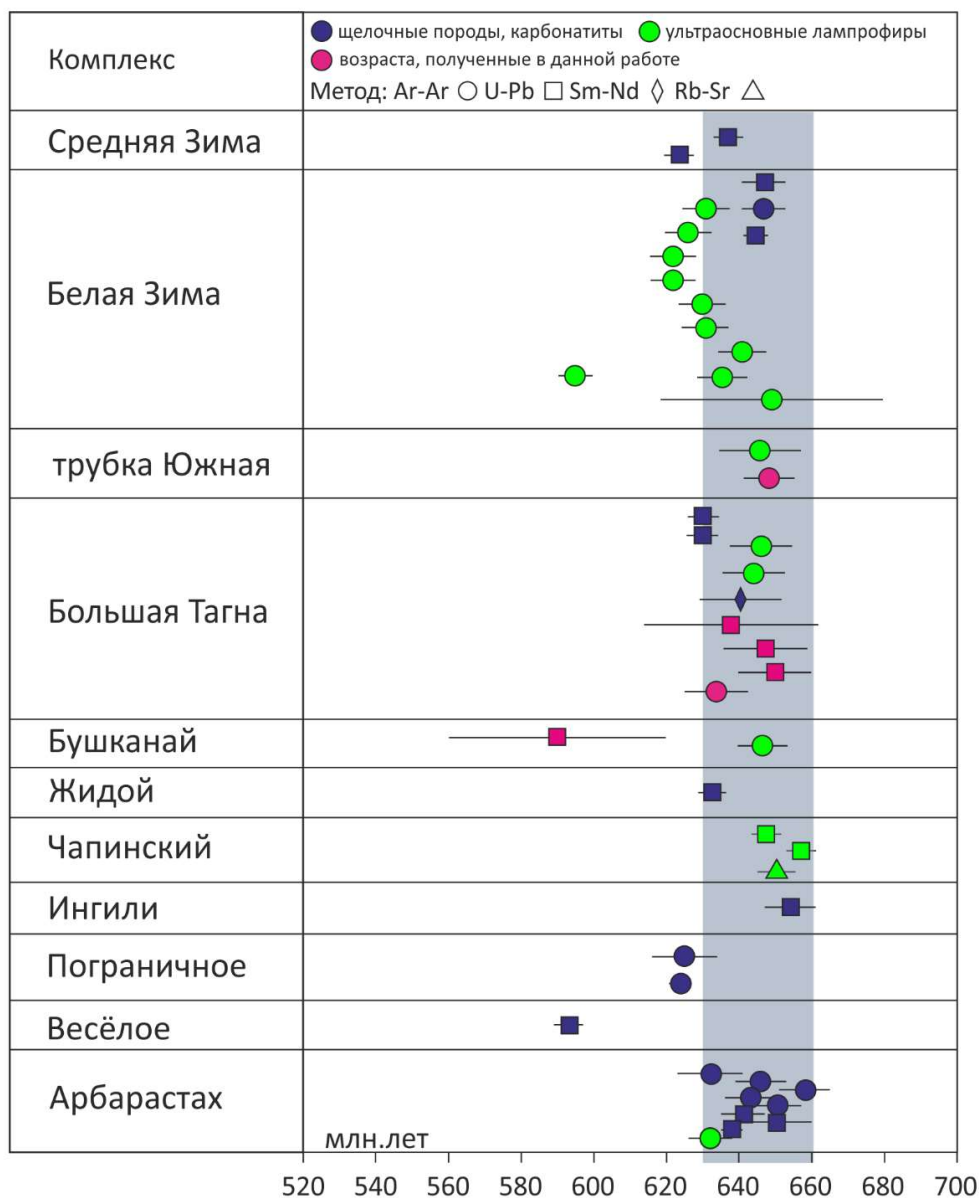


Рисунок 9. Геохронологические данные для неопротерозойских щелочно-карбонатитовых комплексов южной и юго-восточной окраин Сибирского кратона. Данные по комплексам Ингили (Ярмолюк и др., 2005), Арбарастах (Prokopyev et al., 2022; Doroshkevich et al., 2022), Жидой (Ярмолюк и др., 2005), Чапа (Danilova et al., 2024; Шарыгин и др., 2022), Пограничное и Весёлое (Рипп и др., 2009), Белая Зима (Ярмолюк и др., 2005; Doroshkevich et al., 2016; Salnikova et al., 2019; Ashchepkov et al., 2020), Большая Тагна (Savel'eva et al., 2022; Stifeeva et al., 2023), Средняя Зима (Prokopyev et al., 2023; Stifeeva et al., 2023).

Второе защищаемое положение: Минеральный и химический состав айликитов, а также зональное строение минералов свидетельствуют о процессах кристаллизационной дифференциации. Эти процессы были усложнены вовлечением продуктов кристаллизации из более ранних магматических порций.

Составы минералов как индикаторы условий кристаллизации

Высокомагнезиальные ядра оливина из айликитов Бушканайской дайки характеризуются более низкой Mg# (86-89) и более высоким содержанием CaO (0,15-0,2 мас. %) по сравнению с ксеногенными оливинами из перидотитов и метасоматизированной мантии (рис. 10). Также для них характерны идиоморфные формы кристаллов и отсутствие резорбированных границ с каймой. Кроме того, в высокомагнезиальных ядрах и их каймах были обнаружены Al-хромиты,

которые по составу соответствуют хромитам из основной массы. Поэтому мы считаем, что кристаллы оливина с высокомагнезиальными ядрами и каймы оливина минерала с обратной зональностью являются магматическими и кристаллизовались непосредственно из айликового расплава. Дальнейшая кристаллизация оливина связана с уменьшением Mg, Ni, Cr и увеличением Ca, Mn в расплаве, что является результатом кристаллизационной дифференциации.

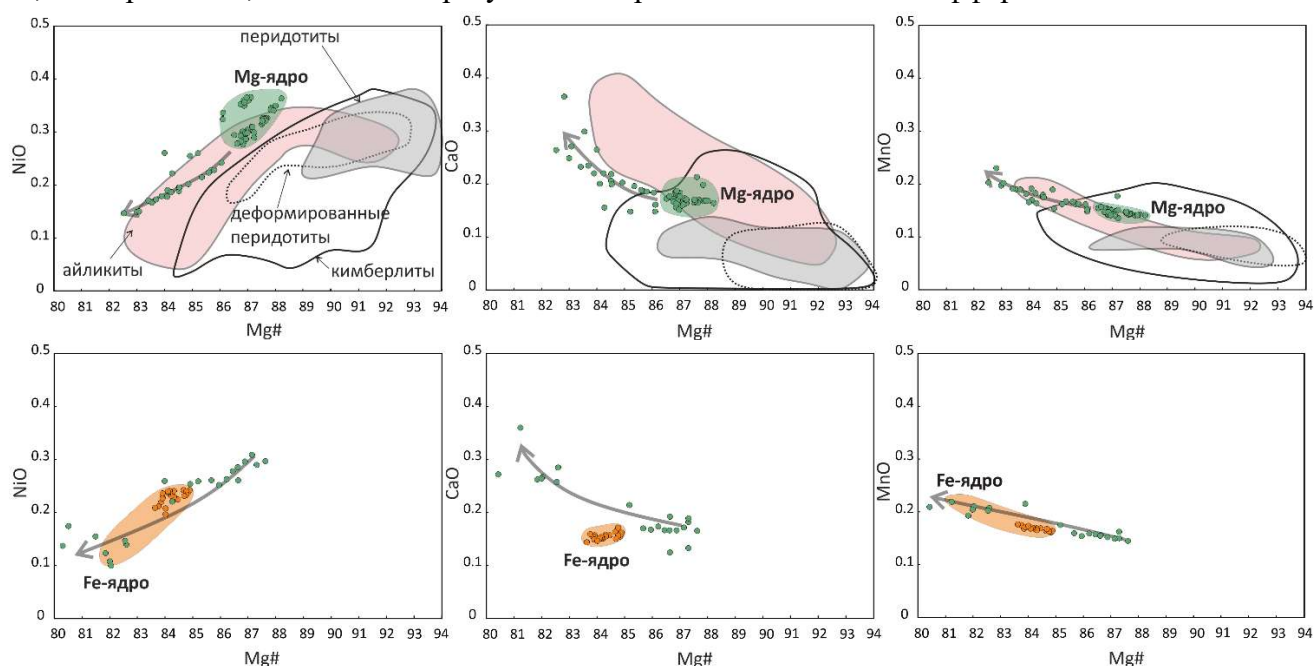


Рисунок 10. Бинарные диаграммы зависимости NiO, CaO и MnO от Mg# состава богатых железом и магнием ядер и кайм оливина из айликов дайки Бушканай. Данные по оливину из айликов и кимберлитов были взяты из работ (Veter et al., 2017) и (Giuliani, 2018), по оливину в перидотитах — из работ (Giuliani, 2018).

На происхождение высокожелезистых ядер оливина существует несколько точек зрения. Их происхождение связано с 1) мантийным метасоматозом, вызванным предшествующими кимберлитовыми или айликовыми расплавами; 2) кристаллизацией из более ранней порции более эволюционировавшей магмы; 3) захваченные при подъёме расплава ксенокристы из базальтов или других вмещающих пород (Cordier et al., 2015; Moore and Costin, 2016; Veter et al., 2017; Howarth, 2018; Nosova et al., 2018). Изученные высокожелезистые ядра оливина не могут являться ксенокристами из базальтов или других пород, так как в пространственной близости от объектов исследования не обнаружено пород, содержащих оливины со схожим составом. Высокожелезистые ядра оливина, образованные при мантийном метасоматозе, имеют более высокую магнезиальность и низкое содержание CaO, MnO по сравнению с высокожелезистыми ядрами оливина из айликов Бушканайской дайки (рис. 11). Фигуративные точки составов, изученных высокожелезистых ядер оливина, попадают в тренд эволюции состава высокомагнезиальных ядер оливина из айликов Бушканайской дайки, поэтому они могут представлять собой продукт кристаллизации более ранней порции более эволюционировавшей магмы.

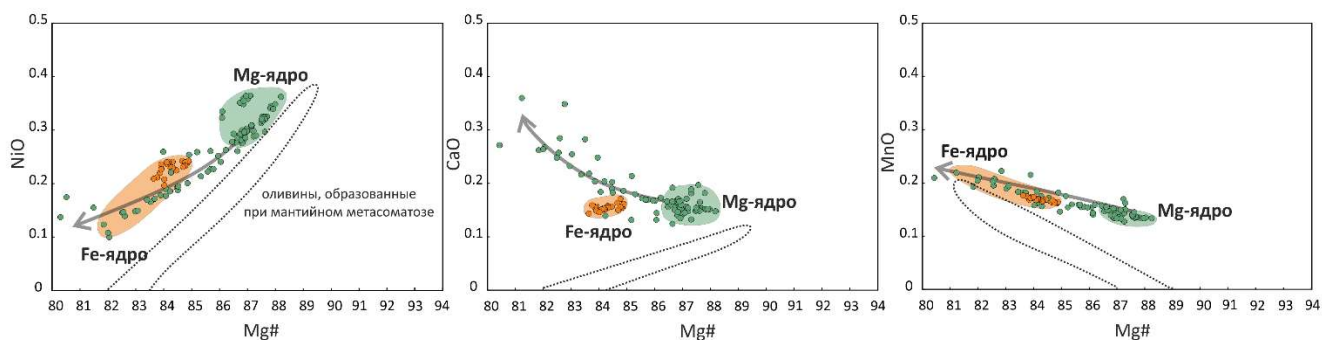


Рисунок 11. Бинарные диаграммы зависимости NiO, CaO и MnO от Mg# состава богатых железом и магнием ядер и кайм оливина из айликитов дайки Бушканай. Составы оливинов, образованные при мантийном метасоматозе, нанесены по (Soltys et al., 2020).

В магнезиальных ядрах оливина были найдены поликристаллические включения, состоящие в основном из клинопироксена и флогопита. Составы флогопита и клинопироксена изученных включений схожи с таковыми минералов основной массы айликитов. Однако более крупный размер этих минералов во включениях подразумевает их кристаллизацию при более спокойных физико-химических условиях. Их текстурно-структурные особенности указывают на то, что они были захвачены айликитовым расплавом в твердом состоянии и служили затравкой для кристаллизации высокомагнезиальных оливинов.

Считается, что образование и подъем кимберлитовых и айликитовых расплавов представляет собой сложный многоактный процесс, в ходе которого некоторые порции расплава не достигают поверхности Земли и кристаллизуются в мантии или коре (Giuliani et al., 2016; Kargin, 2020). Следующие порции кимберлитовых и айликитовых расплавов образуют проникаемую зону (канал), породы стенок которого находятся в равновесии с расплавом айликитов и кимберлитов. Согласно этой модели, большая часть мантийных ксенолитов и макрокристов, принесенных расплавами айликитов и кимберлитов, являются фрагментами стенок каналов, по которым расплавы достигали поверхности (Bussweiler et al., 2018; Kargin, 2020). Эти макрокристы не отражают состав литосферной мантии.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что высокожелезистые ядра оливина и поликристаллические включения в оливине являются продуктом кристаллизации более ранней отдельной порции более эволюционировавшего айликитового расплава и были захвачены при подъеме более поздней порцией расплава. Из-за низкой скорости подъема раннего айликитового расплава, происходила совместная кристаллизация в магматической камере высокожелезистых ядер оливина, клинопироксена и флогопита. И поэтому их составы немного отличаются от состава минералов айликитов зиминского комплекса. Вероятно, что скорость подъема следующих порций расплава была выше и это способствовало началу кристаллизации на более высоких уровнях высокомагнезиальных ядер оливина и хромита, а не высокожелезистого оливина, флогопита и клинопироксена. Наши петрографические исследования подтверждают совместную кристаллизацию оливина и хромита. Кроме того, составы высокоглиноземистых хромитов из айликитов Большетагнинского массива ложатся на глиноземистый тренд 3. П. Редер и Д. Шульце (Roeder and Schulze, 2008) считают, что тренд 3 параллелен кривым изопотенциала оливина и шпинели Ирвина (Irvine, 1965) и является результатом быстрых температурных изменений и совместной кристаллизации оливина и хромита, контролируемой диффузией. На диаграмме 12 в тренде эволюции составов можно наблюдать отсутствие шпинелидов с содержанием Al_2O_3 от 20 до 30 мас. %. Это можно объяснить началом кристаллизации высокоглиноземистых ядер флогопита основной массы айликитов. Эти ядра флогопитов с содержанием Al_2O_3 (14-18 мас. %), FeO (7-18 мас. %), TiO_2 (3-6 мас. %) являются ранними и были закристаллизованы после формирования хромита и до кристаллизации перовскита и Ti-магнетита основной массы (рис. 13). Дальнейшая кристаллизация зерен шпинелидов из айликитов связана с постепенным уменьшением Cr и неизменным Al в расплаве, что может быть

объяснено отсутствием сокристаллизации Al-содержащих фаз (флогопита) с высокоглиноземистыми магнетитами. Зональность кристаллов доломита из айлицитов Большетагинского массива, вероятно, связана с ранней кристаллизацией ядер доломита до начала формирования Fe-содержащих фаз (Ti-магнетитов, Cr-магнетитов), а каймы фиксируют начало кристаллизации Ti-магнетитов. Такая эволюция состава доломита типична для мантийных магнезиокарбонатитов (Doroshkevich et al., 2006).

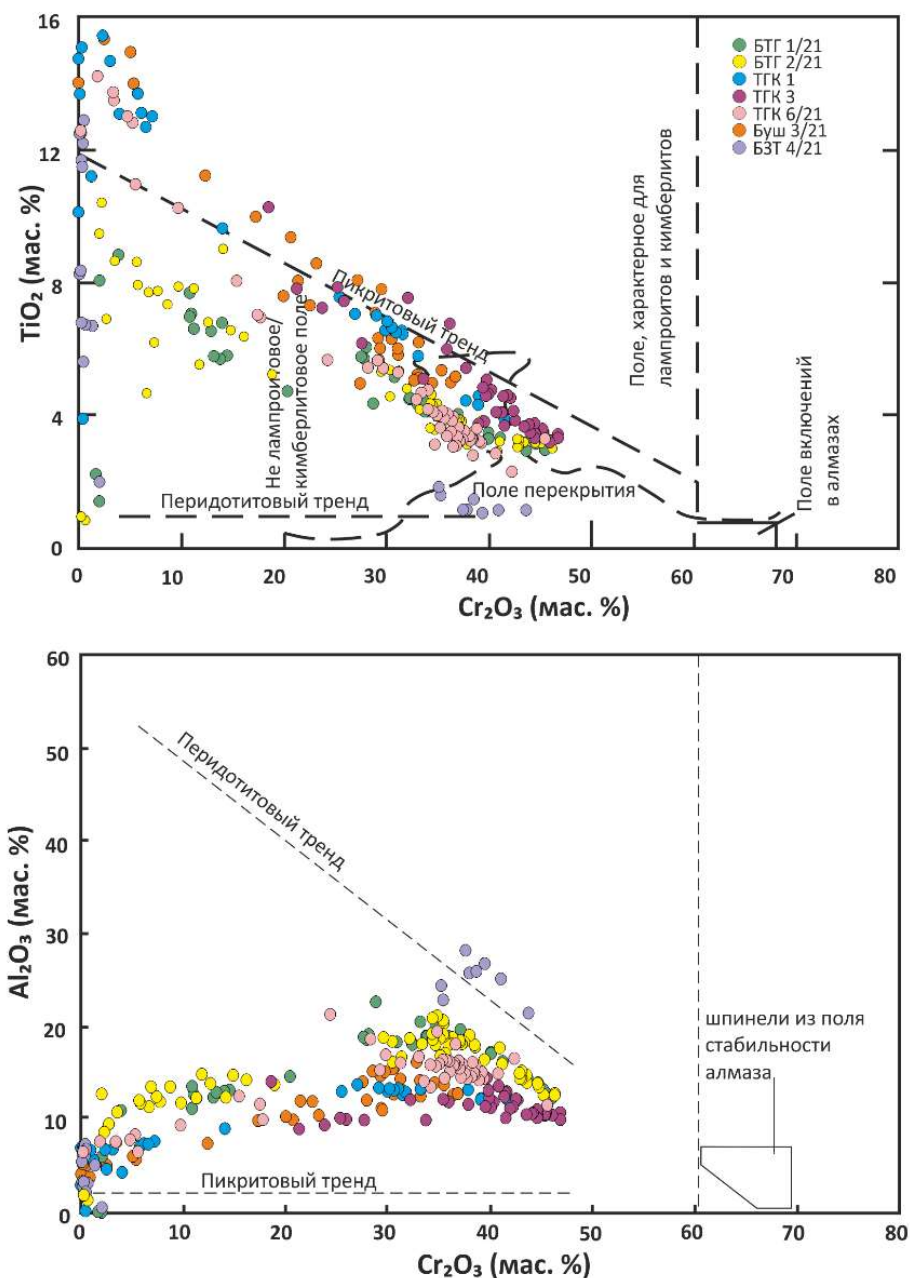


Рисунок 12. Классификационные диаграммы для минералов группы шпинели (Соболев, 1974; Chalapathi Rao et al., 2012).

На позднемагматическом этапе происходит кристаллизация основной массы айлицитов зиминского комплекса: Ti-магнетита, перовскита, флогопита с содержанием Al_2O_3 (10-14 мас. %), TiO_2 (1-2 мас. %), минералов группы апатита, кальцита, андрадита и сульфидов. Ti-магнетит характеризуется относительно невысоким содержанием TiO_2 (до 10 мас. %), что подтверждает его совместную кристаллизацию с перовскитом. Ti-магнетит фиксирует исчезновение Cr, уменьшение Al в расплаве, что могло быть результатом начала кристаллизации флогопита с содержанием Al_2O_3 (10-14 мас. %), TiO_2 (1-2 мас. %).

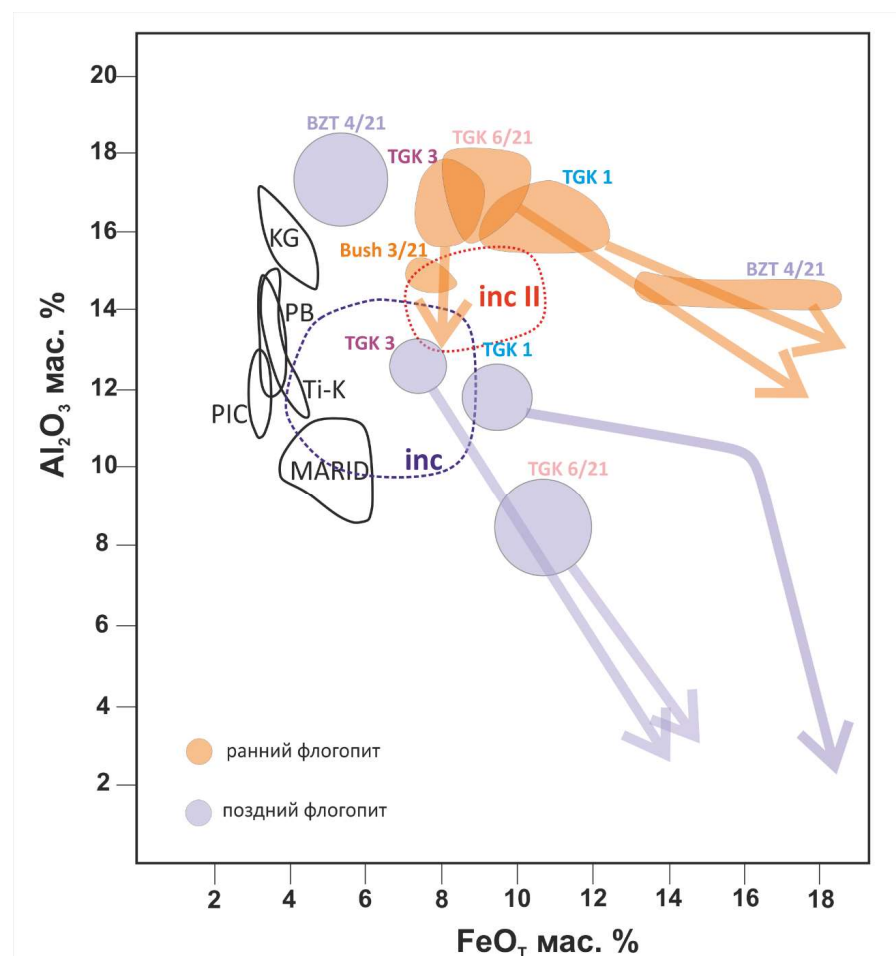


Рисунок 13. Бинарные диаграммы $\text{FeO}_{\text{tot}}\text{-Al}_2\text{O}_3$ для флогопита из ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса. inc II – флогопит из поликристаллических включений, inc – флогопит во включениях из хромитов. Области показаны составы флогопита из мантийных пород: MARID (флогопит-амфибол-рутил-ильменит-диопсид содержащая порода); PIC (флогопит-ильменит-клинопироксен содержащая порода); PB (ксенолиты полимиктовой брекчии из провинции Кимберли, ЮАР); KG (основная масса кимберлитов); Ti-K (высоко-титанистый флогопит из Южно-Африканских кимберлитов) (Kargin, 2021).

Третье защищаемое положение: Первичные расплавы ультраосновных лампрофиров обладали щелочно-карбонатно-силикатным составом и формировались из метасоматизированных гранатовых перидотитов с флогопит-клинопироксеновыми и карбонатными ассоциациями. Эти расплавы демонстрируют изотопно-геохимические характеристики, сходные с породами неопротерозойских щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов южной части Сибирского кратона. В их источнике преобладал изотопно деплетированный компонент.

Геохимия оливина может указать на пироксенитовый или перидотитовый мантийный источник и на наличие карбонатной и флогопитовой составляющих (Sobolev et al., 2007; Herzberg, 2011; Sobolev et al., 2011; Foley et al., 2013; Herzberg et al., 2014; Herzberg et al., 2016; Ammannati et al., 2016; Weiss et al., 2016; Veter et al., 2017; Kamenetsky et al., 2017; Howarth and Harris, 2017; Heinonen and Fusswinkel, 2017; Liu et al., 2017). Оливин из айлицитов Бушканайской дайки имеет концентрации Ni <2000 ppm и содержания Mn >800, Ca >2000, что типично для оливина из перидотитового, а не пироксенитового источника. Айлициты зиминского комплекса обогащены Mg и Cr, что подтверждает их формирование из богатого оливином перидотитового источника.

Сильное фракционирование легких РЗЭ в породах объясняется плавлением перидотита в присутствии граната (Dawson and Smith, 1977; Waters, 1987; Ionov and Hofmann, 1995; Gre'goire et al., 2002, 2003). Поэтому мы считаем, что источником для айликитов зиминского комплекса был гранатовый перидотит. Также состав оливина из айликитов Бушканайской дайки характеризуется низкими отношениями Mn/Fe (1.1-1.2), что обусловлено наличием в источнике флогопита и карбоната. А низкие отношения Ni/Mg (0.2-0.4) связаны с наличием в источнике клинопироксена (рис. 14). Кроме того, первичные расплавные включения в хромите, сложенные флогопитом, карбонатами, клинопироксеном, сульфидами и апатитом, не только подтверждают наличие в источнике карбонатов и К-содержащих фаз, но и указывают на присутствие P_2O_5 и S-содержащих фаз в источнике.

Айликиты зиминского комплекса являются калиевыми породами. Известно, что калий содержащими фазами в мантии являются флогопит и калиевый рихтерит (Dawson and Smith, 1977; Waters, 1987; Ionov and Hofmann, 1995; Gre'goire et al., 2002, 2003). При плавлении калиевого рихтерита получаются расплавы, обогащенные кремнием, похожие на лампроитовые. Однако айликиты зиминского комплекса имеют невысокие концентрации кремния, поэтому калий-содержащей фазой в источнике был флогопит, а не калиевый рихтерит. Айликиты зиминского комплекса обогащены крупноионными литофильными элементами и легкими РЗЭ. Такое обогащение может быть связано с наличием карбонатов в источнике. Этот факт также подтверждается петрографическими наблюдениями (наличие магматического карбоната в изученных айликитах).

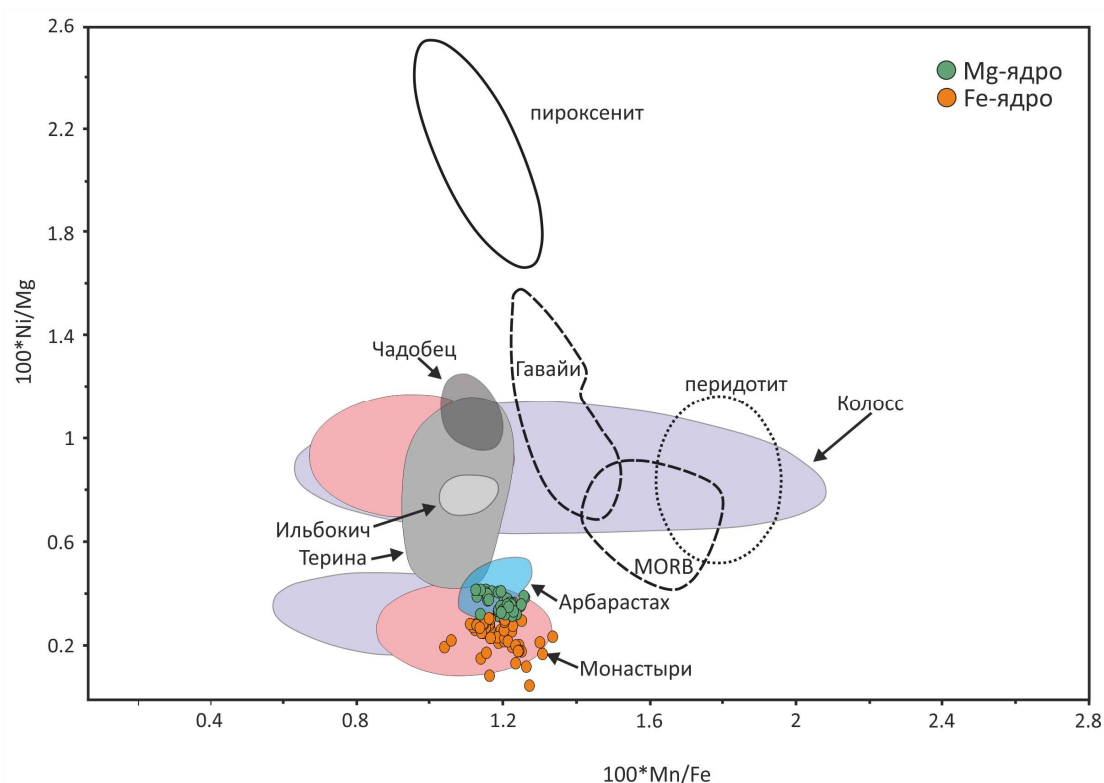


Рисунок 14. $100 \cdot Ni/Mg$ vs $100 \cdot Mn/Fe$ отношения для макрокристов оливина из айликитов Бушканайской дайки. На диаграмме приведены области составов мегакристов оливина из кимберлитов и родственных пород: Монастыри и Колосс (Moore and Costin, 2016; Howarth, 2018; Bell et al., 2004); Чадобецкого комплекса (Nosova et al., 2018; Starikova et al., 2021); комплекса Арбарастах (Doroshkevich et al., 2022). Поля составов оливина из перидотитов, пироксенитов и базальтов нанесены по (Veter et al., 2017).

Полученные Sr и Nd значения для ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса и пород неопротерозойских щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов юго-западной,

южной и юго-восточной окраин Сибирского кратона: Белая Зима, Средняя Зима, Арбарастах, Татарский (Morikiyo et al., 2000; Владыкин и др., 2005; Врублевский и др., 2012; Хромова и др., 2020; Doroshkevich et al., 2024) попадают в квадрант диаграммы, обедненный Sr и обогащенный Nd, типичный для деплетированного мантийного источника. При этом ультраосновные лампрофиры при схожих значениях $\epsilon\text{Nd}(t)$ характеризуются большим разбросом $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (I) по сравнению с породами щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов. Эти вариации можно было бы объяснить наличием флогопита в источнике по сравнению с таковым для пород щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов. Но с другой стороны, поля значений по изотопному составу стронция перекрываются и в источнике, согласно полученным данным, присутствует карбонат. Наличие последнего приводит к тому, что в выплавке преобладает низкорациогенный Sr (Kargin et al., 2014). Поэтому, наиболее приемлемым объяснением являются вторичные процессы изменения ультраосновных лампрофиров, приведшие к вариациям $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (I) по сравнению с $\epsilon\text{Nd}(t)$. Этот факт подтверждается петрографическими наблюдениями. Кроме того, изотопно-геохимические параметры айлицитов свидетельствуют об источнике, который был изотопно деплетированным. Изотопный состав Nd в изученных айликитах не свидетельствует о значительно оторванном во времени обогащении мантийного источника ультраосновных лампрофиров несовместимыми микроэлементами. Обогащение LREE должно было произойти незадолго до плавления, чтобы получить положительные значения ϵNd , схожие с составом изотопно деплетированной мантии.

Петрогенезис родительской магмы айлицитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса

Предполагается, что растяжение литосферы при расколе суперконтинента Родинии в неопротерозое является причиной проявления щелочного магматизма в Северной Америке, Гренландии и в южной части Сибирского кратона (Яромлюк и др., 2005; Moore et al., 2008; Jelsma et al., 2009; Chalapathi Rao et al., 2013; Tappe et al., 2017; Doroshkevich et al., 2022, 2024). Прогрессирующее растяжение литосферы приводит к поднятию более горячей астеносферы на более верхние уровни под континентальными окраинами и сопровождается частичным плавлением при давлении выше 5 ГПа. Это подтверждается расчетными данными для неопротерозойских ультраосновных лампрофиров юга Сибирского кратона (Ashchepkov et al., 2020; Doroshkevich et al., 2022). При плавлении генерируется небольшая порция расплава, похожего по составу на карбонатитовый (Wyllie, 1980; Dalton and Presnall, 1998). Эти расплавы при подъеме сталкиваются с холодным основанием кратонной литосферы, в следствии чего они кристаллизуются из-за их низкой теплоемкости, образуя карбонатные жилы с небольшим количеством апатита, ильменита и бадделейта (Spera, 1984, 1987; McKenzie, 1989; Meen et al., 1989). Продолжающееся растяжение литосферы еще больше поднимает границу астеносферы и литосферы и это приводит к плавлению карбонатных жил с вмещающими гранатовыми перидотитами с флогопит-клинопироксеновыми ассоциациями и акцессорными P_2O_5 - и S-содержащими фазами (рис. 15).

В результате плавления образуются гибридные высококальциевые карбонатно-силикатные (прото-айлицитовые) расплавы (Tappe et al., 2006). Полученные первые порции прото-айлицитовых расплавов поднимались к земной поверхности, но из-за их небольших объемов и высокой реакционной способности с вмещающими породами они кристаллизовались, образуя метасоматизированные каналы. Следующие порции расплавов поднимались по этим каналам и достигали земной поверхности из-за того, что имели более большие объемы и меньше реагировали с вмещающими породами (Giuliani et al., 2016).

При подъеме айлицитового расплава первыми начали кристаллизоваться оливин и хромит. Затем формировались клинопироксен и ранний флогопит. На позднемагматическом этапе, при быстро меняющихся физико-химических условиях кристаллизовалась основная масса (Ti-магнетит, перовскит, апатит, флогопит, карбонаты, сульфиды) айлицитов зиминского комплекса.

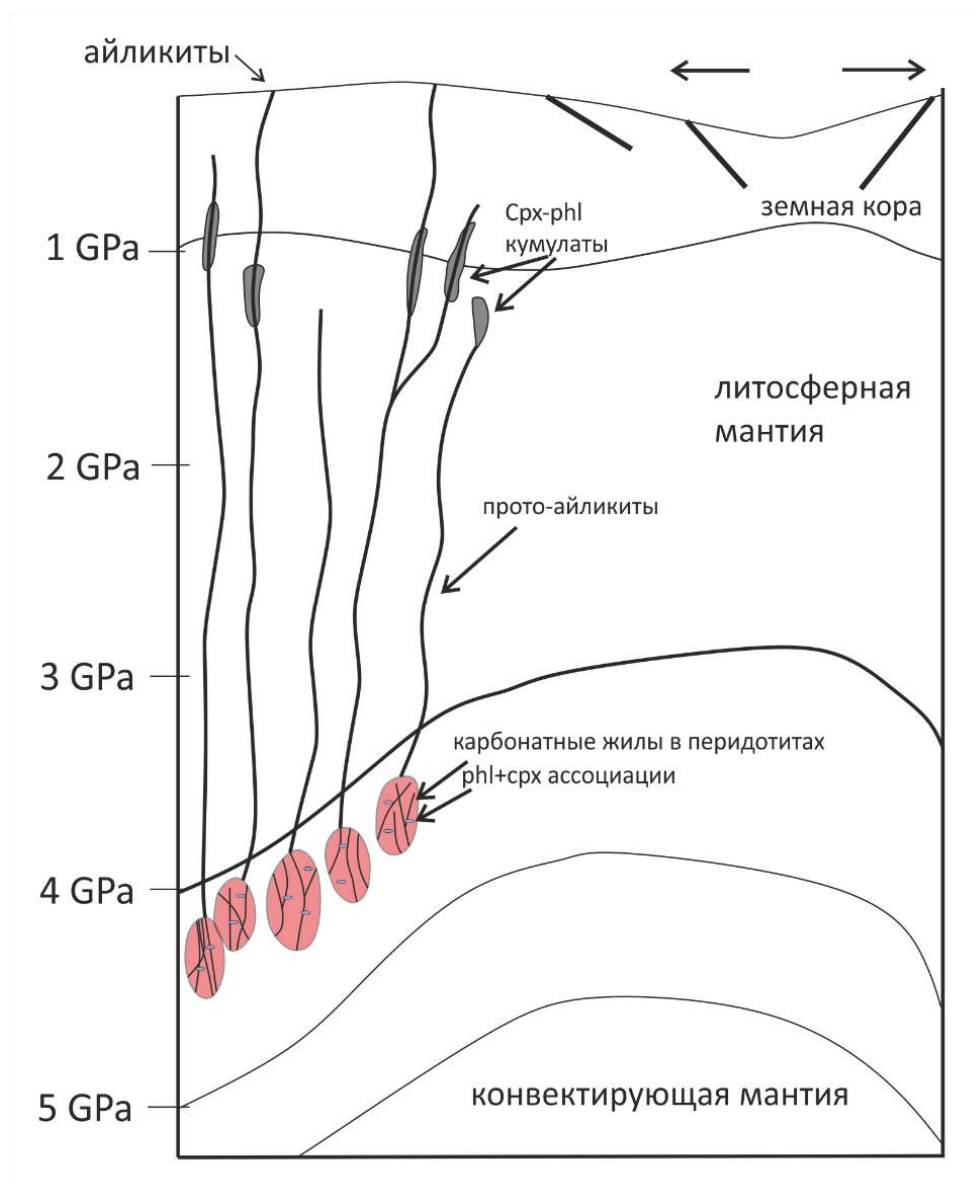


Рисунок 15. Модель образования айликитов зиминского комплекса (по Tappe et al., 2006; Giuliani et al., 2016; Ashchepkov et al., 2020 с авторскими дополнениями). На схеме серым цветом показаны мантийные каналы, по которым поднимались более поздние порции айликитовых расплавов. Красным цветом показаны прото-айликидовые расплавы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований айликитов зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса был детально изучен минеральный и химический состав пород, дана изотопная (Sr, Nd) характеристика, а также определен их возраст образования.

Полученные новые данные о составе минералов айликитов зиминского комплекса были использованы для их классификации, определения условий кристаллизации и характеристики мантийного источника. По микрокомпонентному составу оливина было определено, что источником для первичного расплава айликитов Бушканайской дайки был перидотит, содержащий флогопит-клинопироксеновую и карбонатную компоненты. Это подтверждается петрографическими наблюдениями, высокими содержаниями MgO, Sr в изученных породах, обогащением LILE и легкими РЗЭ на мультиэлементных спектрах. Согласно изученному составу расплавных включений в хромитах, содержащих апатит и сульфиды, в источнике присутствовали P_2O_5 - и S-содержащие фазы.

Минералы айликитов зиминского комплекса имеют сложное зональное строение и дают важную информацию об их последовательности и особенностях кристаллизации. Было

установлено, что высокожелезистые ядра оливина и поликристаллические включения в оливине являются продуктом кристаллизации более ранней отдельной порции более эволюционировавшего айликитового расплава и были захвачены при подъеме более поздней порцией расплава. Из-за низкой скорости подъема раннего айликитового расплава, происходила совместная кристаллизация высокожелезистого оливина, клинопироксена и флогопита. Вероятно, что скорость подъема следующих порций расплава была выше и это способствовало началу кристаллизации на более высоких уровнях высокомагнезиальных ядер оливина и хромита. Также после формирования хромитов и до перовскита и Ti-магнетита основной массы, кристаллизуется высокоглиноземистый флогопит. На позднемагматическом этапе происходит кристаллизация основной массы айликитов зиминского комплекса: Ti-магнетита, перовскита, флогопита, минералов группы апатита, кальцита, андрадита и сульфидов.

Возраст формирования айликитов Большетагнинского массива, Бушканайской дайки, трубки Южная находится в пределах 647-591 млн. лет и соответствует неопротерозою. Полученные возраста хорошо согласуются с временем образования других даек ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса, так же как ультраосновных лампрофиров и пород щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов в юго-западной, южной и юго-восточной частях Сибирского кратона. Таким образом, изученные айликиты формируются как синхронно с породами зиминского комплекса и неопротерозойскими щелочно-ультраосновными карбонатитовыми комплексами Сибирского кратона, так и завершают этап их становления.

По содержанию и поведению редких элементов изученные породы относятся к единой геохимической группе. Исходные расплавы для ультраосновных лампрофиров имели изотопно-геохимические параметры близкие к таковым для пород неопротерозойских щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов юга Сибирского кратона и были сформированы из источников, в которых преобладал изотопно деплетированный компонент.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Нугуманова Я.Н.**, Дорошкевич А.Г. Состав шпинелидов из позднепротерозойских ультраосновных лампрофиров Большетагнинского щелочно-ультраосновного карбонатитового массива (Урикско-Ийский грабен, Восточное Присяянье) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. V. 13. Iss. 4.
2. **Нугуманова Я.Н.**, Калугина А.Д., Старикова А.Е., Дорошкевич А.Г., Прокопьев И.Р. Минералы группы апатита из ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса (Урикско-Ийский грабен, Восточное Присяянье) // *Литосфера*. 2023. V. 23. Iss. 4. P. 589–602.
3. **Nugumanova Ya.**, Doroshkevich A., Starikova A., Garcia J. Composition of olivines and spinel group minerals in aillikites from the Bushkanay dike, South Siberian Craton: Insights into alkaline melt sources and evolution // *Geosystems and Geoenvironment*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100247>
4. **Nugumanova, Ya.**, Doroshkevich, A., Kalugina, A., Chebotarev, D., Izbrodin, I., Hou, T. Age and composition of perovskite in ultramafic lamprophyres from the Zima complex, south of Siberian craton: petrogenetic implications // *Geochemistry*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126159>
5. **Нугуманова Я.Н.**, Дорошкевич А.Г., Старикова А.Е., Пономарчук А.В. Возраст и состав флогопита из ультраосновных лампрофиров зиминского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса, юг Сибирского кратона // *Геология и геофизика*. 2024. DOI:10.15372/GiG2024131