

На правах рукописи



Аило Юссеф

**ГЛУБИННЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ИЗ КАЙНОЗОЙСКИХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД
ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЫ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ В СТРУКТУРЕ
РАННЕПАЛЕОЗОЙСКОГО СЛЮДЯНСКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 25.00.04 – петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого–минералогических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ИГУ») и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения РАН (ИЗК СО РАН), г. Иркутск

Научный руководитель: **Рассказов Сергей Васильевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой динамической геологии Иркутского государственного университета (ФГБОУ ВО «ИГУ») и заведующий лабораторией изотопии и геохронологии, главный научный сотрудник Института земной коры Сибирского отделения РАН (ИЗК СО РАН).

Официальные оппоненты: **Горнова Марина Аркадьевна**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии основного и ультраосновного магматизма, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИГХ СО РАН)

Ащепков Игорь Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования динамики эндогенных и техногенных систем Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева (ИГМ СО РАН)

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН (ФГБУН ДВГИ ДВО РАН), г. Владивосток

Защита диссертации состоится «09» сентября 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.022.02 при федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте: <http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull221/3454.pdf>

Отзывы об автореферате в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета к.г.-м.н. Б.С. Данилову по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128 или e-mail: boris@crust.irk.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д. 003.022.02,
кандидат геолого-минералогических наук



Б.С. Данилов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Формирование континентальной коры и ее строение служило предметом обсуждения в течение последних десятилетий [Sun, 2018; Hawkesworth et al., 2019]. Типичная кора рассматривалась как состоящая из трех слоев: верхнего (соответствующего по составу глинистым сланцам), среднего (амфиболитового) и нижнего (гранулитового) [Taylor, McLennan, 1985; Rudnick, Fountain, 1995; Sammon et al., 2022]. Изучение глубинных включений из кайнозойских вулканических пород показало, однако, что такое строение нередко нарушается. В Восточной Австралии и других регионах мира в петрологической зоне перехода кора–мантия гранулиты перемежаются с линзами шпинелевых, амфиболовых лерцолитов и пироксенитов [O'Reilly, Griffin, 1985, 2013]. Гранулиты обнажаются на земной поверхности в Слюдянском кристаллическом комплексе, представляющем собой результат раннепалеозойского метаморфизма края Хамардабанского террейна, сопредельного с краем Сибирского палеоконтинента [Беличенко и др., 2006]. В современном эрозионном срезе обнажается зональный комплекс пород, претерпевших метаморфизм от зеленосланцевой до гранулитовой фации [Шафеев, 1973; Васильев и др., 1981]. В процессе позднекайнозойского развития Байкальской рифтовой системы Слюдянский метаморфический блок играл роль ослабленной зоны литосферы, в которой получили развитие процессы рифтогенной трансензии, сопровождавшиеся вулканизмом в Тункинской долине [Рассказов и др., 2013]. Вдоль этой долины построена детальная сейсмотомографическая модель коры и подкоревой мантии [Мордвинова и др., 2019]. Вулканические породы вынесли на земную поверхность глубинные нодулы, несущие информацию о составе и условиях кристаллизации пород в корневой части метаморфического блока. Актуальность работы заключается в построении ее реалистичного глубинного разреза при согласовании опубликованной геофизической модели с результатами изучения щелочных базальтоидов и содержащихся в них глубинных включений.

Объект исследования – вулканические породы восточной части Тункинской долины Байкальской рифтовой системы и их глубинные включения.

Цель работы – построить петрологический разрез литосферы корневой части древнего метаморфического блока, активизированной новейшей рифтовой структурой.

Задачи:

1. Систематизировать поликристаллические глубинные нодулы из вулканических пород по химическому и минеральному составу.
2. Определить РТ условия глубинного материала.
3. Провести сопоставление источников вулканических пород Тункинской рифтовой долины и рифтовых структур Западной Сибири.

Фактический материал и методы исследований. В восточной части Тункинской долины получены данные по составу 90 образцов вулканических пород из разрезов вулканических и вулканогенно-осадочных толщ. Выполнены определения петрогенных оксидов, микроэлементов и изотопных отношений Rb вулканических пород (19 образцов). Из щелочных оливиновых базальтов вулкана Карьерный для исследований отобрано более 200 образцов глубинных нодул: шпинелевых перидотитов, иногда флогопит-амфиболсодержащих (32 образца), пироксенитов со шпинелью, флогопитом, реже, с апатитом, титанитом, плагиоклазом и амфиболом (31 образец) и габброидов (4 образца). Выполнены определения петрогенных оксидов и микроэлементов глубинных включений (29 образцов). Для сравнения изучались глубинные нодулы других местонахождений Тункинской долины. Просмотрено более 80 шлифов и проведена систематизация пород, изготовлено 10 шашек для микронзондовых исследований минералов. При личном участии автора выполнено около 650 микронзондовых химических анализов минералов. Измерены концентрации редких элементов в оливинах методом лазерной абляции (около 40 определений, метод LA-ICP-MS) и в пироксенах (21 определение, метод ICP-MS).

Петрографические исследования шлифов проводились на поляризационных микроскопах Olympus BX51 (ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН), Olympus BX53 (ИГУ, геологический факультет) и MicroOptix MX 400 (Т) (ИЗК СО РАН). Содержания петрогенных оксидов в вулканических породах и их глубинных включениях определялись методом количественного химического анализа «мокрой химии», микроэлементов – методом индуктивно-связанной плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) с использованием масс-спектрометра Agilent 7500ce (ЛИИ СО РАН). Элементный анализ оливина, пироксенов, шпинели, слюды, амфибола, полевых шпатов, апатита, титанита, ильменита, магнетита и титаномагнетита выполнен с использованием электронно-зондового микроанализатора Superprobe JXA-8200 фирмы Jeol (Япония) (ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН). Концентрации микроэлементов в оливине из включений определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с использованием лазерной абляции (LA-ICP-MS) в ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН, а в пироксенах из включений определялись методом индуктивно-связанной плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS).

Изотопный состав Pb проводился на MC-ICP-MS Neptune Plus (ИГХ им. В.И. Виноградова СО РАН). Минеральные фазы глубинных включений определялись с использованием микронзондового метода (ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН). Вулканические породы датировались K–Ar методом. Содержания радиогенного аргона определялись на модифицированном масс-спектрометре МИ 1201, содержания калия – методом пламенной фотометрии как среднее трех аликвот (ИЗК СО РАН).

Научная новизна. Разработана систематика поликристаллических глубинных нодулей из вулканических пород Тункинской долины по химическому составу и составу минералов с оценкой РТ параметров. Для корневой части древнего метаморфического блока получен более крутой наклон тренда по сравнению с кондуктивными геотермами. Выявлено сходство источников вулканических пород Тункинской рифтовой долины и рифтовых структур Западной Сирии по процессам, проявленным в зоне корово-мантийного перехода континентальной литосферы.

Достоверность выводов обосновывается представительным объемом фактических материалов, полученных при полевых и лабораторных исследованиях, выполненными корреляциями разрезов вулканических толщ с применением результатов K–Ar датирования, применением высокоточного аналитического оборудования и контролем измерений по международным стандартным образцам.

Практическая значимость работы. Со слюдяным метаморфическим комплексом ассоциируются многочисленные редкие минералы. Глубинные нодули являются источником камнецветного сырья. В вулканических породах Тункинской долины имеются находки хризолита и сапфира ювелирного качества.

Личный вклад. Автором собрана и обработана коллекция образцов вулканических пород вулкана Карьерный и глубинных нодулей из них, проведена их систематизация. Исследованы породы в шлифах с использованием поляризационного микроскопа. Подготовлены пробы для различных аналитических исследований. Изготовлено десять шашек для определений состава минералов с помощью микронзонда. Автор принимал непосредственное участие в выполнении анализов, обработке, обобщении и интерпретации полученных данных. Выполнил пересчеты содержания петрогенных оксидов минералов на формульные единицы. Обработал полученные результаты, построил вариационные диаграммы для пород и минералов, сформулировал основные выводы.

Защищаемые положения:

1. Глубинные нодули из вулканических пород Карьерного вулкана, извергавшегося около 13 млн лет назад, представлены: 1) вторично обогащенными реститами шпинелевых перидотитов, 2) вторично обогащенными шпинелевыми перидотитами, близкими по составу к первичной мантии, 3) метасоматитами, 4) магматическими перидотитами, комплементарными реститам и 5) породами смешанного магматического и метасоматического генезиса. Петрогенетические группы глубинных нодулей различаются между собой по составу породообразующих минералов: клинопироксена, оливина, хромшпинели, слюды, амфибола и полевых шпатов.

2. Под восточной частью Тункинской долины ниже слоя гранулитов находится слой авгитовых, салитовых, диопсидовых, фассаитовых и плагиоклазовых пироксенитов, габброидов и микропикродолеритов, сменяющихся слоем перидотитов и пироксенитов и более глубинным слоем реститовых гранатовых перидотитов.

3. В рифтовых структурах Западного Прибайкаля и Западной Сирии изливались кайнозойские магматические расплавы из источников континентальной мантии реститового типа, комплементарных материалу средней и нижней континентальной коры.

Апробация работы и публикации

По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 2 статьи из перечня ВАК, 1 статья в международном журнале. Основные результаты работы апробированы на региональной научной конференции студентов и молодых ученых по наукам о Земле (Иркутск, ИГУ – 2016), региональной научной конференции студентов и молодых ученых по наукам о Земле (Иркутск, ИГУ – 2017), XXVII Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» с участием исследователей из других стран (Иркутск, ИЗК СО РАН – 2017), XV Всероссийском совещании «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)» (Иркутск, ИЗК СО РАН – 2017), V Всероссийской научно-практической конференции Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии (ГИН СО РАН, Улан-Удэ – 2018), региональной научной конференции студентов и молодых ученых по наукам о Земле (Иркутск, ИГУ – 2018), XXVIII Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (ИЗК СО РАН – 2019), VI Всероссийской с международным участием конференции «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал» (Иркутск, ИГХ СО РАН – 2019), IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева «Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы» (Иркутск, ИЗК СО РАН – 2019), EGU General

Assembly (Vienna – 2020), XIII Всероссийское петрографическое совещание (с участием зарубежных ученых) «Петрология и геодинамика геологических процессов» (Иркутск, ИГХ СО РАН и ИЗК СО РАН, 2021), научной конференции «Петрология и рудоносность магматических формаций», посвященной памяти член-корреспондента АН СССР и РАН Г.В. Полякова и профессора А.Г. Владимирова (Новосибирск, ИГМ СО РАН, 2022), и Генеральной Ассамблеи EGU (Vienna, 2022).

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, восьми глав и заключения. Объем основного текста работы составляет 167 страниц, включая 81 рисунок и 8 таблиц. Четыре приложения содержат 30 рисунков и 18 таблиц. Список литературы состоит из 199 наименований.

Благодарности

Работа выполнена на кафедре динамической геологии в рамках работ Совместной лаборатории современных методов исследований в динамической и инженерной геологии ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» и Института земной коры СО РАН при прохождении аспирантуры на геологическом факультете университета по госбюджетным темам НИР ИГУ по научному направлению «Континентальный тектогенез и сопутствующие процессы», раздел: «Магматизм и тектоника» и Института земной коры СО РАН по проекту IX.136.2. «Новейшая геодинамика, геосферные и биосферные эволюционные и катастрофические природные изменения» (№ 0346-2016-0005) с использованием внебюджетных средств по гранту РНФ 18-77-10027. Аналитические исследования проводились с использованием оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН им. А. П. Виноградова, «Ультрамикроанализ» ЛИИ СО РАН и «Геохронология геодинамика» ИЗК СО РАН. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, профессору С.В. Рассказову за постановку задач исследований, представленные материалы и обсуждение полученных результатов, И.С. Чувашиной (ИЗК СО РАН, ИГУ) и Т.А. Ясныгиной (ИЗК СО РАН) – за помощь в обработке данных, Г.В. Бондаревой, Е.Г. Колтуновой, Н.Н. Царевой, М.М. Самойленко (ИЗК СО РАН) – за выполненные аналитические определения петрогенных оксидов, М.Е. Марковой, Е.В. Сараниной (ИЗК СО РАН) – за подготовку проб для анализа микроэлементов методом ИСП-МС, А.П. Чебыкину (ЛИИ СО РАН), В.И. Ложкину (ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН) – за выполненные масс-спектрометрические измерения этим методом, Л.Ф. Суворовой (ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН) – за выполненные микронзондовые анализы минералов, Н.В. Брянскому (ИГХ СО РАН) за определения микроэлементов в минералах методом LA-ICP-MS, Л.Ф. Суворовой (ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН), Е.В. Сараниной и Н.С. Герасимову (ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН) – за измерения изотопного состава Pb, С.С. Брандту и М.М. Самойленко (ИЗК СО РАН) – за измерения радиогенного аргона и калия, И.Г. Барашу (ИЗК СО РАН) – за помощь в изготовлении шашек для микронзондового анализа, Т.В. Калашниковой (ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН) и Д.А. Ахмедову (ИЦ ИГУ) – за помощь и консультации в описании шлифов, С.А. Сасиму (ИГУ) – за помощь в работе на оборудовании ИГУ, А.Т. Королькову, А.И. Сизых, С.П. Летунову (ИГУ) – за обсуждение диаграмм и классификаций пород, К. Арсентьеву (ЛИИ СО РАН) и И.С. Шарыгину (ИЗК СО РАН) – за консультации в изучение минералов, А.М. Дымшиц – за обсуждение РТ-диаграмм.

Глава 1. Обзор предшествующих исследований и геологическая обстановка образования Тункинской долины Байкальской рифтовой системы

Основные закономерности осадконакопления и вулканизма в Тункинской долине были охарактеризованы в работах Н.А. Флоренсова [1960] и Н.А. Логачева [1956; 1974]. При изучении стратиграфии вулканогенно-осадочных толщ Тункинской долины вулканические породы были выявлены в составе угленосной (танхойской) свиты, датированной по палеонтологическим данным верхним олигоценом–нижним плиоценом, охристой (аносовской) свиты, датированной верхним плиоценом–эоплейстоценом, вулканогенно-осадочной (ахаликской) свиты, отнесенной к эоплейстоцену, и песчаной свиты, датированной средним-поздним плейстоценом. Выполненное К–Аг и Аг–Аг датирование показало вулканические извержения в Тункинской долине во временном интервале 18.1–0.86 млн лет назад [Рассказов, 1993; Рассказов и др., 2010а].

Глубинные включения из вулканических пород Тункинской долины были обнаружены и охарактеризованы в работах 70-х годов. Впервые они были отмечены Н.Я. Волянюком и др. [Волянюк, Семенова, 1975а,б] в субвулканических породах некка Сухой (хр. Камар восточного окончания долины) и вулканических породах р. Хобок (Тункинская впадина центральной части долины). Позже глубинные включения более детально изучались С.В. Рассказовым [Рассказов и др., 1989а,б, 1992; Рассказов, 1993; Рассказов и др., 1994; Рассказов и др., 2000; Рассказов и др., 2010а; Чувашова, Рассказов, 2014].

В Слодянском районе ксенолиты найдены в крупном вулканическом некке, обнаженном в левом борту р. Сухая (точка б на рис. 1). В составе включений преобладают зеленые шпинелевые перидотиты,

встречаются пегматоидные вебстериты с пироксенами, обнаруживающими структуры распада твердых растворов. Для перидотитов рассчитываются умеренные температуры минеральных равновесий (около 1000 °С), для пегматоидных пироксенитов – 1350–1450 °С [Рассказов и др., 1994].

В центральной части Тункинской долины была установлена поперечная смена состава глубинных включений по отношению к ее простирианию, совпадающему с простирианием зон гранулитового метаморфизма. Ассоциации включений из базальтов характеризуют обстановку глубинного уровня коры и корово-мантийного перехода в позднем миоцене и в плиоцен-четвертичное время [Рассказов и др., 1992].

Установлена смена состава включений вкрест простириания метаморфических зон Слюдянского кристаллического комплекса от амфибол-содержащих на Тункинских гольцах (точка 4 на рис. 1.2) через черную авгит-содержащую группу включений в центральной части Тункинской впадины, зеленую фassaит-содержащую группу в ее юго-восточной части (междуречье Иркута и Ахалика) (точка 2 на рис. 1.2) к ассоциации двух групп включений: черной (с авгитом) и зеленой (с хромдиопсидом) на северном склоне хр. Хамар-Дабан (точка 1 на рис. 1.2).. При этом существенно меняется степень окисленности железа в клинопироксенах и шпинели. Для базальтов, извергавшихся в зоне гранулитового метаморфизма (в центральной части Тункинской впадины), характерны включения с восстановленным железом. При переходе в зону амфиболитового метаморфизма степень окисленности железа меняется от полностью восстановленного состояния до полностью окисленного [Рассказов и др., 2010a].

В осевой части Тункинской долины (точка 3 на рис. 1.2, Хобок) в разновозрастных базальтах, выделены три группы включений.

Первая группа – лерцолит-кликопироксенитовый ряд пород – присутствует в позднемиоценовых и плиоцен-четвертичных базальтах. Включения были вынесены базальтовыми расплавами из одного глубинного горизонта, в котором за 7–8 млн лет могли произойти изменения, отразившиеся в особенностях минеральных парагенезисов.

Вторая группа – лерцолит-ортопироксенитовый ряд пород, высокомагнезиальные гарцбургиты и фassaитовые клинопироксениты – характерна только для верхнемиоценовых базальтов.

Третья группа – габброидные породы и одиночные клинопироксеновые и плагиоклазовые мегакристаллы – не встречается в верхнемиоценовых базальтах, но появляется в плиоцен-четвертичных. Это свидетельствует об образовании мегакристаллов при взаимодействии магматических расплавов с вмещающими породами нижней коры [Рассказов и др., 1992].

В юго-восточной части Тункинской впадины (междуречье Иркута и Ахалика) были обнаружены ксенолиты зеленых скарноподобных шпинельсодержащих и бесшпинелевых клинопироксенитов (точка 2 на рис. 1.2). Исследование сложных образцов из этого местонахождения включений показало, что шпинельсодержащие породы кристаллизовались в сильно восстановленных условиях, а бесшпинелевые – в сильно окисленных. Среди включений из базальтов Тункинской котловины ксенолитов зеленых хромдиопсидсодержащих шпинелевых лерцолитов не обнаружено, но этот тип включений был идентифицирован в базальтах южного плеча рифтовой долины (точка 1 на рис. 2.2). И в минералах скарноподобных пород из базальтов местонахождения 2, и в хромдиопсидах шпинелевых лерцолитов местонахождения 1 были определены широкие вариации восстановленности–окисленности железа [Рассказов и др., 1992, 2010a].

При сравнительном анализе кристаллического материала из верхнемиоценовых и плиоцен-четвертичных щелочных базальтов северо-восточной части Тункинской впадины установлены признаки общего разогрева глубинных пород до температуры 1300 °С с появлением частичных выплавок. В юго-восточной части Тункинской впадины в глубинных породах из верхнемиоценовых базальтов до появления расплава существовала окислительная обстановка, а в глубинных породах из плиоцен-четвертичных вулканических пород – восстановительная обстановка [Рассказов и др., 1992]. Переход от восстановительных условий к сильно меняющимся восстановительным и окислительным условиям в глубокой части земной коры и подкоровой мантии сопоставлялся с пространственным переходом в породах фундамента от гранулитовой фации к фациям меньших давлений и температур (от зоны V к зоне I на рис. 1.2) [Рассказов и др., 2010a].

Распространение фassaит-содержащих пород в слюдянском кристаллическом комплексе, подобных по составу породам глубинных включений из базальтов, предполагает непосредственную связь источников вулканических пород с развитием новейших рифтовых структур со структурой фундамента. Для выяснения характера этой связи настоящая работа сконцентрирована на исследовании вулканитов Быстринской зоны, пересекающей осевую структуру восточной части Тункинской долины, и глубинных включений из лавового потока Карьерного вулкана этой зоны (точка 5 на рис. 1).

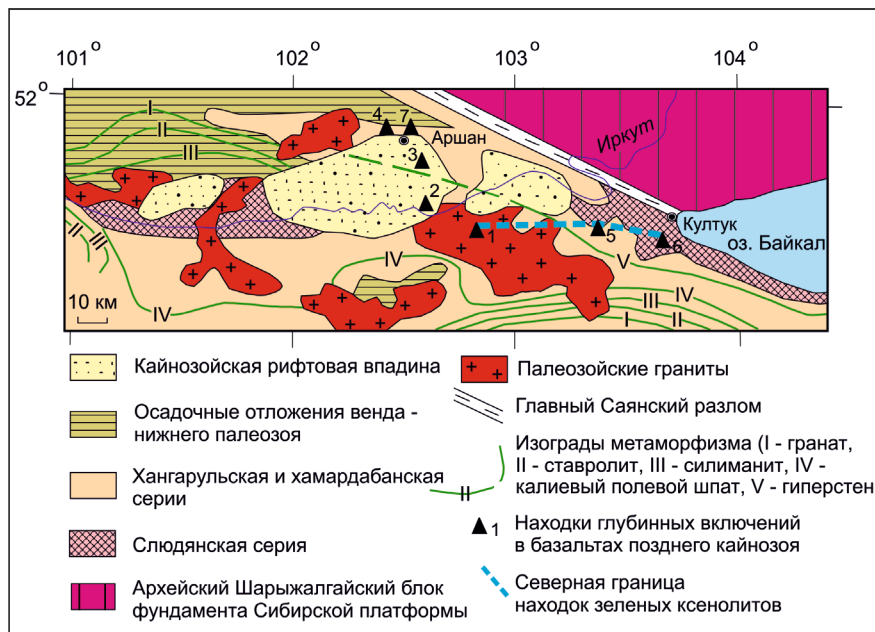


Рис. 1. Геологическая схема фундамента. Составлена с использованием работ А.А. Шафеева, В.Г. Беличенко, Л.З. Резниченко и других геологов с дополнениями автора.

Рифтовые впадины Байкальской системы в основном лишены новейшего вулканизма. Авулканичны и крупнейшие Южно-Байкальская и Северо-Байкальская озерные впадины. Такая пространственная разобщенность вулканизма и рифтогенеза была отмечена уже на первых этапах геологических исследований кайнозоя территории юга Восточной Сибири и воспринималась как свидетельство отсутствия прямой связи между этими процессами [Флоренсов, 1968; Рассказов, 1993]. В некоторых осевых рифтовых структурах вулканизм все же проявился. Эти случаи требуют специального изучения. Тункинская рифтовая долина – осевая структура Байкальской рифтовой системы – примыкает с запада к Южно-Байкальской впадине. Восточная часть долины заложена вдоль простираения пород Слюдянского метаморфического субтеррейна Хамардабанского террейна. Подобные метаморфические комплексы протягиваются вдоль всего юго-восточного края Сибирского палеоконтинента.

Глава 2. Методики аналитических исследований

Методика ICP-MS приведена в работах [Ясныгина и др., 2003; Рассказов и др., 2012], изотопного анализа Pb – в работе [Rasskazov et al., 2020], K–Ar датирования вулканических пород – в работе [Рассказов и др., 2000]. Возраст рассчитывался по константам: $\lambda_K=0,581 \cdot 10^{-10}$; $\lambda_\beta=4,962 \cdot 10^{-10}$; $\lambda_K+\lambda_\beta=5,543 \cdot 10^{-10}$ лет⁻¹, где λ_K – постоянная захвата электрона K-оболочки ядром ⁴⁰K; λ_β – постоянная β -распада.

На электронно-зондовом микроанализаторе Superprobe JXA-8200 фирмы Jeol (Япония) выполнялся количественный анализ химического состава минералов на спектрометрах с волновой дисперсией (ВДС), позволяющих регистрировать не только основные, но и примесные элементы. с пределом обнаружения 0,05 — 0,1 мас. %. с. Определялись элементы: F, Na, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca, Cr, V, Ti, Mn, Fe, Ni, Zn, Ba. Проводилась съемка пятью спектрометрами с волновой дисперсией при аналитических условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка электронов 20 нА, диаметр пучка электронов 1 мкм, время счета импульсов 10 с на пике линии, фона – по 5 с с каждой стороны от линии. Для регистрации аналитического сигнала микрокомпонентов использовался светосильный Н-тип рентгеновского спектрометра. В качестве стандартов использовались природные минералы, аттестованные как лабораторные образцы сравнения в ИГМ СО РАН: альбит (Na, Al), диопсид (Ca), оливин (Si, Mg, Fe), ортоклаз (K), апатит (Cl, P), F-apatит (F), Mn-гранат (Mn), Cr-шпинель (Cr), ильменит (Ti) и шпинели NiFe₂O₄ (Ni), V₂O₅-(V), ZnS-(Zn), BaSO₄-(Ba).

Для анализа методом LA-ICP-MS использовалась лазерная система NWR 213 eSi, присоединенная к квадрупольному масс-спектрометру NexION 300D. Точки выбрали посредством бинокулярного микроскопического исследования образцов, чтобы избежать попадания в анализируемую область трещин и включений в минералах. Размер лазерного пятна составлял 50 мкм, частота лазера составляла 10 Гц, энергия лазера 8 Дж/см². Скорость несущего газа гелия 0.4 л/мин, добавочного аргона 1 л/мин, энергия плазмы 1500 Вт. Каждый анализ состоял из 20-секундного измерения фонового сигнала и 40-секундной абляции. Сигнал нормировался на ²⁷Si по значениям, полученным ранее методом рентгеноспектрального микроанализа по исследуемой области. Были измерены изотопы: ⁷Li, ²³Na, ²⁴Mg, ²⁷Al, ²⁹Si, ³¹P, ³⁹K, ⁴³Ca,

^{44}Ca , ^{45}Sc , ^{47}Ti , ^{51}V , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{55}Mn , ^{56}Fe , ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{60}Ni , ^{63}Cu , ^{64}Zn , ^{65}Cu , ^{66}Zn , ^{68}Zn , ^{69}Ga , ^{88}Sr , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{93}Nb , ^{118}Sn , ^{120}Sn , ^{138}Ba , ^{139}La , ^{140}Ce , ^{172}Yb , ^{173}Yb , ^{174}Yb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U . Для расчета использовались стандартные образцы NIST SRM 610-614.

Глава 3. Распределение позднекайнозойского вулканизма в Тункинской долине, состав вулканических пород и их источники

Рифтовая долина состоит из шести впадин (с запада на восток): Мондинской, Хойтогорьской, Туранской, Тункинской, Торской и Быстринской. Впадины отделены друг от друга междувпадинными поднятиями (перемычками). Долина ограничена с севера крутым склоном Тункинских гольцов, а с юга – пологим склоном хребтов Мунку-Сардык, Ургудеевский и Хамар-Дабан. Средний сегмент долины составляет наиболее крупная (65×32 км) Тункинская впадина глубиной более 2500 м. Другие впадины, расположенные восточнее и западнее, имеют меньшие размеры и глубины [Флоренсов, 1960; Зорин, 1971] (рис. 2).

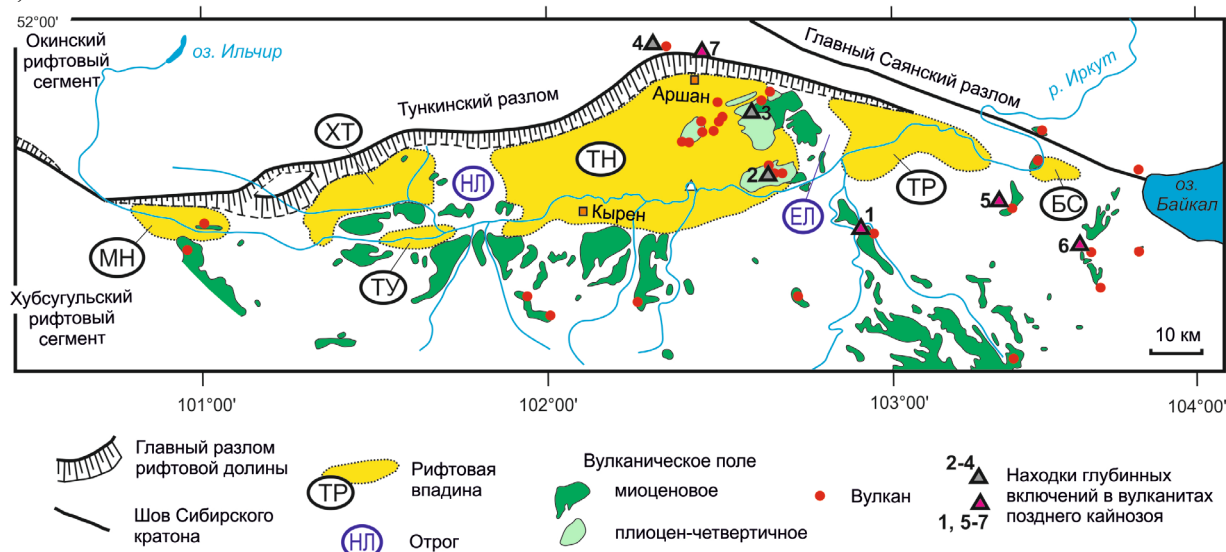


Рис. 2. Распределение позднекайнозойских вулканических пород в Тункинской долине ([Чувашова, Рассказов, 2014] с добавлениями автора). Впадины: МН – Мондинская, ХТ – Хойтогорьская, ТУ – Туранская, ТН – Тункинская, ТР – Торская, БС – Быстринская. Междувпадинные перемычки: ЕЛ – Еловская, НЛ – Ниловская. Местонахождения глубинных включений: 1 – Козья Шейка, 2 – р. Иркут, 3 – р. Хобок, 4 – Тункинские гольцы-1, 5 – вулкан Карьерный, 6 – вулкан Сухой, 7 – Тункинские гольцы-2.

В Тункинской рифтовой впадине вулканическая деятельность началась в палеоцене и возобновлялась в течение всего кайнозоя [Логачев, 1974]. В развитии позднекайнозойского вулканизма различаются два этапа: средне-верхнемиоценовый и плиоцен-четвертичный. Каждый из этапов характеризовался сменой состава лав во времени от оливин-толеитового к щелочно-оливин-базальтовому [Рассказов, 1985, Магомедов и др., 1987]. В породах заключительных фаз обоих этапов вулканизма распространены глубинные включения. В восточной части Тункинской долины вулканизм проявился в Камарско-Становой зоне горячей трансенсии во временном интервале 18–12 млн лет назад. Быстринскую зону образуют Зыркузунский, Анчукский и Карьерный вулканы. Глубинные включения находятся на южных окончаниях Быстринской и Камарской зон, в породах вулканов Карьерный и Сухой возрастом около 13–12 млн лет.

Петрохимические и микроэлементные данные свидетельствуют об отчетливом группировании составов вулканических пород. На классификационной диаграмме $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ фигуративные точки пород Тункинской впадины и вулканов Быстринской зоны распределились в полях трахибазальта и базальта и разделились на группы, образующие тренды, сходящиеся между собой в области трахибазальта (рис. 3). Вдоль Быстринской зоны *hu*-нормативные породы сменялись *ne*-нормативными в направлении с севера на юг. На Зыркузунском вулкане, в зоне Главного Саянского разлома, базальты имели *hu*-нормативный состав, на Анчукском вулкане осевой части Тункинской долины *hu*-нормативные породы ассоциировались с *ne*-нормативными, на Карьерном вулкане южного плеча этой долины изливались лавы *ne*-нормативных щелочных оливиновых базальтов.

Оценки возраста источников вулканических пород по изотопным отношениям Pb составляют на Култукском вулкане и в Тункинской впадине 2.44–2.22 млрд лет, на Карьерном вулкане – около 1.31 млрд лет [Rasskazov et al., 2021; Левицкий и др., 2021].

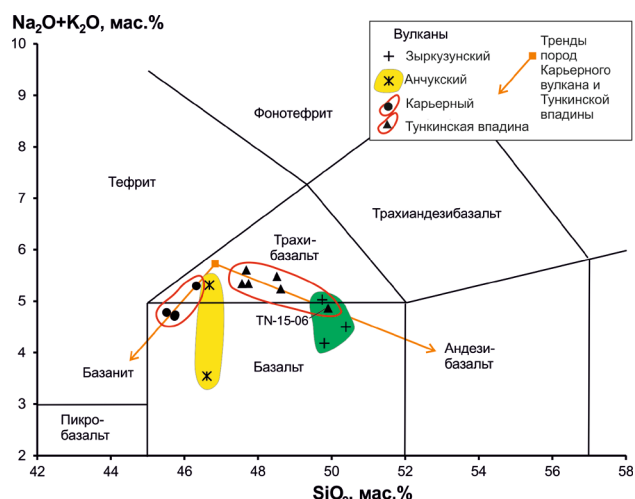


Рис. 3. Группирование пород вулканов Быстринской зоны и Тункинской впадины на классификационной диаграмме щелочи–кремнезем. Показаны разделительные линии номенклатуры вулканических пород, принятой Международным союзом геологических наук [Аило и др., 2021б].

На диаграмме Th/Yb – Ta/Yb фигуративные поля всех вулканических пород Тункинской долины (Быстринской зоны и Тункинской впадины) находятся ниже направления OIB–MORB. Такой характер смещения элементных отношений предполагает преобразование мантийных источников вулканических пород частичным плавлением с отделением компонента, соответствующего составу континентальной коры [Аило и др., 2021б]. Один тренд обозначает извлечение из источника типа OIB компонента, близкого к среднему составу коры (составу средней части коры). Тренд образуется при слабом смещении точек базальтов Зыркузунского вулкана и более заметном – базальтов и трахибазальтов Тункинской впадины. Другой тренд протягивается к составу нижней коры с разной степенью извлечения нижнекорового компонента: слабого – из источника пород Анчукского вулкана и более продвинутого – из источника пород Карьерного вулкана (рис. 4а).

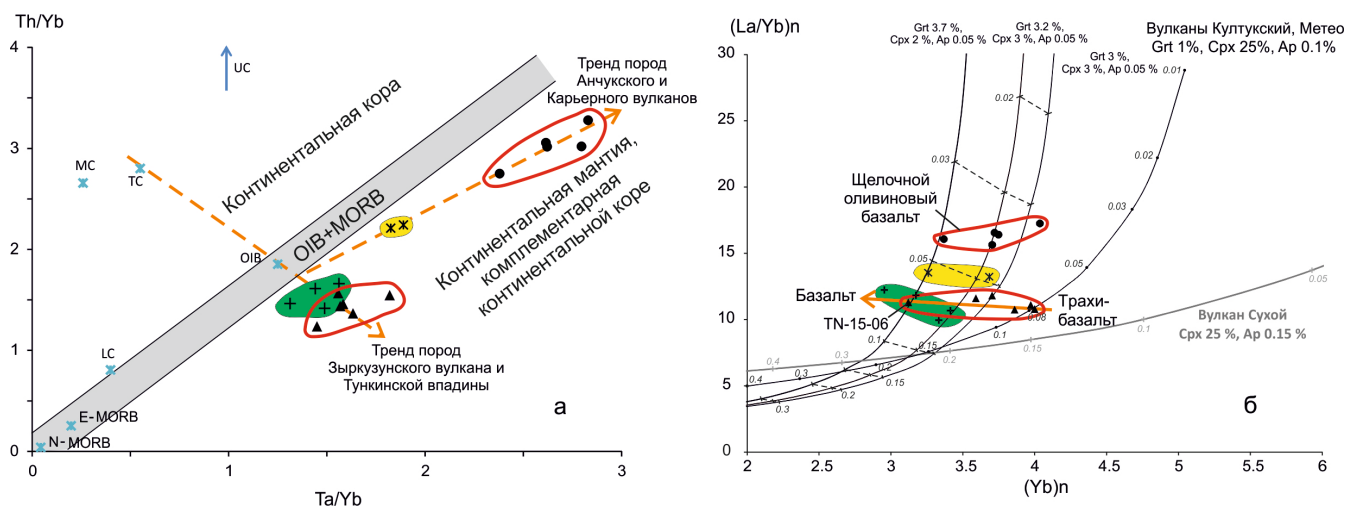


Рис. 4. Диаграммы Th/Yb–Ta/Yb (а) и (La/Yb)_n–(Yb)_n вулканических пород Быстринской зоны и Тункинской впадины (б). На панели а штриховыми линиями со стрелками показаны тренды компонентов континентальной мантии и коры. Составы обогащенного и нормального базальтов срединных океанических хребтов (E-MORB и N-MORB) и базальта океанических островов (OIB) показаны по работе [Sun, McDonough, 1989], компоненты нижней коры (LC, lower crust), средней коры (MC, middle crust), верхней коры (UC, upper crust) и общего состава коры (TC, total crust) – по работе [Rudnick, Fountain, 1995]. На панели б иллюстрируются модельные кривые частичного плавления источников (процедура расчета кривых дана в работе [Расказов и др., 2013]). Цифры курсивом на модельных кривых показывают долю расплава. Рядом с модельными кривыми показаны процентные содержания минералов в источниках в расчете на 100 %. Содержание ортопироксена во всех случаях составляет 25 %, оставшаяся минеральная фаза – оливин. Составы нормированы к пиролиту [McDonough, Sun, 1995]. Усл. обозн. см. рис. 3.

Допускается двухэтапный сценарий образования источников. На первом этапе из источника типа OIB под Тункинской впадиной, Зыркузунским и Култукским вулканами извлекался компонент среднего состава коры, на втором этапе из частично преобразованных источников под Анчукским и Карьерным вулканами извлекались нижнекоровые компоненты. Результаты микроэлементного моделирования

свидетельствуют об образовании вулканических пород Быстринской зоны из апатит-содержащего источника с варьирующим содержанием граната (3.2–3.7 %) и в основном с низким содержанием клинопироксена (2–3 %). Роль последней минеральной фазы возрастает в источнике пород Тункинской впадины (рис. 46).

Глава 4. Петрогенетическое группирование глубинных нодулей

Глубинные нодули представлены зеленой группой (с хромдиопсидом) и черной (и/или темной) группой (с авгитом, салитом, диопсидом и фассаитом). В составе зеленой группы (с хромдиопсидом) преобладают Spl лерцолиты, иногда встречаются Spl-Phl лерцолиты, Phl-Am-Spl лерцолиты, Spl гарцбургиты, Spl-Phl гарцбургиты, верлиты, Spl верлиты, Spl-Phl верлиты, Ol вебстериты, Spl-Ol вебстериты, Am вебстериты, Spl-Ol ортопироксениты, дуниты и Spl-Ol клинопироксениты. В составе черной (и/или темной) группы преобладают клинопироксениты, Am клинопироксениты, ортопироксениты, вебстериты, редко встречаются Ar вебстериты, Spl-Ol вебстериты, Am ортопироксениты (клинопироксен меняет состав от авгита до хромдиопсида) и Spl лерцолиты (BS-16-116, клинопироксен имеет диопсидовый состав). Почти все изученные породы (перидотиты, дуниты и частично оливиновые вебстериты) имеют лерцолитовый парагенезис минералов.

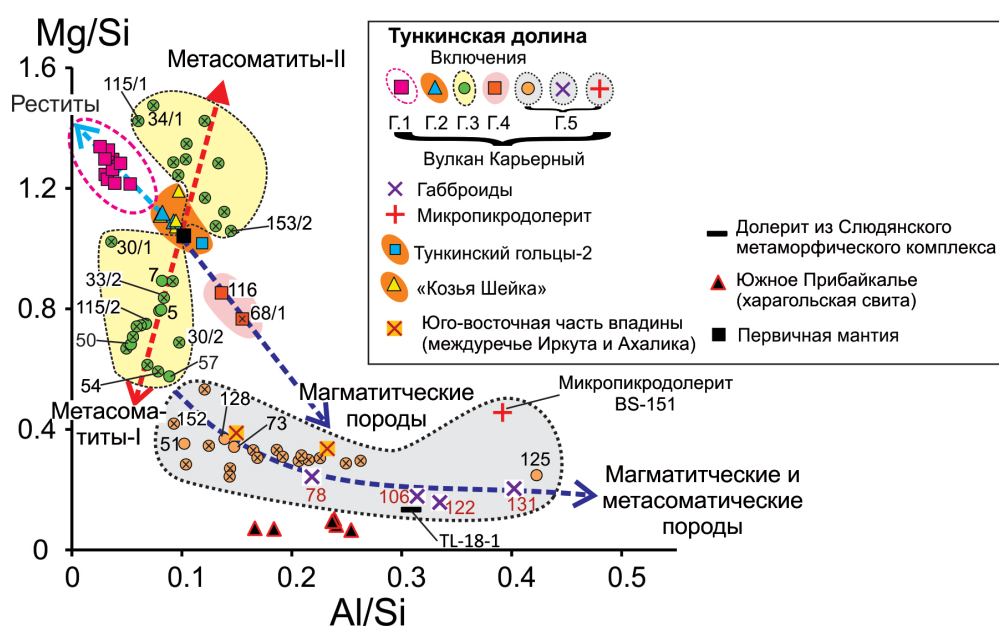


Рис. 5. Группирование включений на диаграмме Mg/Si – Al/Si (концентрации элементов в мас. %) [Аило и др., 2021a]. Синими штриховыми линиями со стрелками обозначены тренд обеднения пород групп 1 и 2 относительно состава первичной мантии (светло-синяя часть) и тренд комплементарных магматитов (темно-синяя часть). Темно-синей штриховой линией показан тренд магматитов и метасоматитов, красной штриховой линией – тренд метасоматитов. Значения Mg/Si и Al/Si для пород групп 2, 3, 4 и 5 получены по результатам силикатных анализов. Часть значений рассчитана, исходя из пропорций и состава порообразующих минералов, определенного на микрозонде (символы помечены косым крестиком). Г.1–Г.5 – номера групп. Для включений, близких к составу первичной мантии, использованы данные из местонахождения Козья Шейка [Расказов и др., 2000], для ксенолитов зеленых фассаитовых клинопироксенитов из местонахождения юго-восточной части Тункинской впадины использованы данные [Расказов и др., 1989a], для местонахождения Тункинских гольцов – новые данные. Состав первичной (примитивной) мантии из работы [Крёнер и др., 1987]. Для сопоставления на диаграмме показаны составы пород харагольской свиты слюдянского метаморфического комплекса из работы [Резницкий и др., 2004] и дайки микрогаббро, прорывающей слюдянский метаморфический комплекс (обр. TL-18-1, новые данные).

На диаграмме Mg/Si–Al/Si, которая использовалась А. Крёнером и др. [1987] для выделения состава первичной (примитивной) мантии, глубинные включения из пород вулкана Карьерный разделяются на пять групп (рис. 5): 1) реститов, 2) слабо истощенных пород, близких к первичному составу силикатной Земли, 3) метасоматитов, 4) магматических пород, комплементарных реститовым перидотитам, и 5) пород смешанного магматического и метасоматического происхождения. Включения групп 1–3 относятся к «зеленым», групп 4–5 – к «черным». Близкие по составу включения были определены в местонахождениях Козья Шейка [Расказов и др., 2000] и Тункинских гольцов-2 (новые данные). Эти находки свидетельствуют об общем распространении выделенных групп пород под Тункинской долиной.

На диаграмме Th/Yb – Ta/Yb фигуративные точки глубинных пород распределяются вдоль направления OIB-MORB и смещены выше этого направления в область состава нижней и средней коры, что свидетельствует о вторичном обогащении пород. Средние концентрации легких редкоземельных элементов (РЗЭ) (от La до Sm) возрастают по группам: слабо истощенные реститы, близкие к составу первичной мантии (группа 2), сильно истощенные реститы (группа 1), магматиты (группа 4), метасоматиты (группа 3) и породы смешанного метасоматического и магматического генезиса (группа 5) (рис. 6 а,б,в). Включения габброидов по среднему содержанию легких РЗЭ занимают промежуточное положение между третьей и пятой группами (рис. 6 г). Спектры РЗЭ группы 1 сопоставляются по форме со спектрами РЗЭ известково-силикатных пород (кристаллических сланцев и гнейсов) харагольской свиты Слюдянского комплекса, но имеют более низкие содержания РЗЭ. В группе 5 и частично в группе 3 содержания РЗЭ возрастают и соответствуют содержаниям известково-силикатных пород.

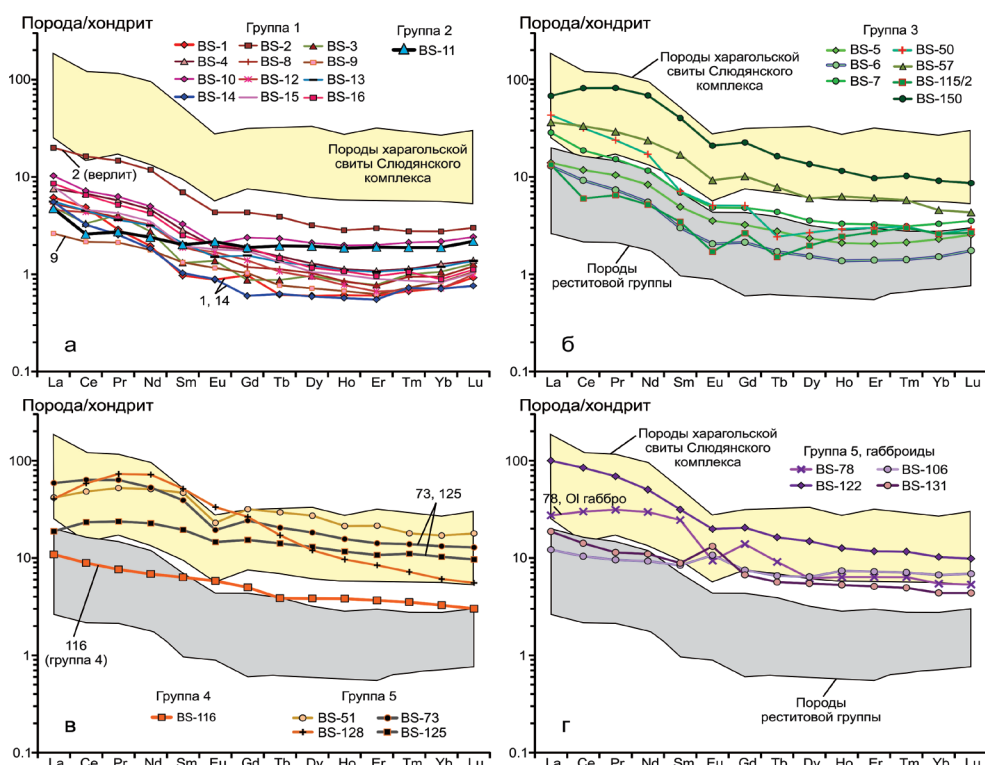


Рис. 6. Спектры редкоземельных элементов (нормированных к хондриту) глубинных нодулей из лав Карьерного вулкана (а–г). Для нормирования использован состав хондрита [McDonough, Sun, 1995]. Состав пород харагольской свиты Слюдянского комплекса из работы [Резницкий и др., 2004].

Глава 5. Состав породообразующих минералов глубинных пород

Пять групп глубинных нодулей отчетливо разделяются по составу слагающих минералов: пироксенов, оливина, хромшпинели, слюды, амфибола и полевых шпатов. Понижение содержания форстерита (Fo) в оливине сопровождается широкими вариациями CaO, снижением – NiO и возрастанием MnO. Снижение концентрации NiO отражает переход от шпинель-пироксеновой к оливин-плаггиоклазовой фации глубинности (рис. 7) [Аило и др., 2021a]. В слюде глубинных нодулей возрастание титана свидетельствует о переходе от реститов группы 1 с низко-Ti флогопитом через метасоматиты группы 3 флогопитов с повышенным Ti к метасоматитам-магматитам группы 5 с наиболее титанистой слюдой флогопит-биотитового состава. Амфибол – редкий минерал изученной ассоциации нодулей – встречен в группах 3 и 5. В лерцолитах групп 2 и 3 находятся жилы микропикродолеритов группы 5, в которых определены фассаит, титанофассаит, диопсид, энстатит, форстерит, лабрадор, санидин, ильменит и хромшпинель.

Характер процессов в ассоциациях пород зоны коромантийного перехода в соотношении процессами в ассоциациях пород нижней и средней коры раскрывается при анализе особенностей концентраций микроэлементов в клинопироксенах. В отличие от оливина и шпинели, содержащих информацию о совместимых элементах, клинопироксен несет информацию о соотношении глубинных пород с первичным материалом Земли по несовместимым микроэлементам. Этот минерал – главный концентратор элементов, резко обогащающих расплав при частичном плавлении перидотита. Графически соотношения глубинных

пород с первичным силикатным материалом Земли представлены для клинопироксена в нормированных спектрах редкоземельных и несовместимых элементов (рис. 8).

Обогащенный состав РЗЭ спектров клинопироксенов глубинных пород группы 1 свидетельствует о том, что после частичного плавления с образованием рестигов, эти породы претерпели метасоматическое обогащение. С учетом перехода между клинопироксенами с контрастным содержанием тяжелых РЗЭ породы группы 1 рассматриваются как вторично обогащенные рестигом. На соотношения легких и тяжелых РЗЭ в клинопироксене рестигов может влиять распределение РЗЭ в сосуществующих минеральных фазах. Наибольший контраст с клинопироксеном обеспечивает гранат, в котором концентрируются преимущественно тяжелые РЗЭ. Обогащение клинопироксена легкими РЗЭ может быть следствием гранатосодержащего парагенезиса рестигов, утратившего гранат в процессе эволюции коры и подкоревой мантии. Если гранат никогда не входил в минеральный парагенезис вторично обогащенных рестигов группы 1, существенное обогащение легкими РЗЭ клинопироксена могло обеспечиваться распределением РЗЭ в других минеральных фазах. Идентификация таких фаз требует дополнительных исследований. Спектр РЗЭ клинопироксена породы, близкой к первичному составу силикатной Земли (группа 2, обр. BS-11) (рис. 8а) заметно смещен относительно клинопироксенов группы 1 с понижением концентраций легких РЗЭ. Концентрации промежуточных и тяжелых РЗЭ (от Eu до Lu) в этом спектре приближаются к концентрациям состава рестигов равновесного плавления пиролита.

Истощение глубинного материала относительно первичной мантии было умеренным и не достигало степени истощения, свойственной океаническим перидотитам. Тренды истощения выражены в возрастании хромистости шпинели.

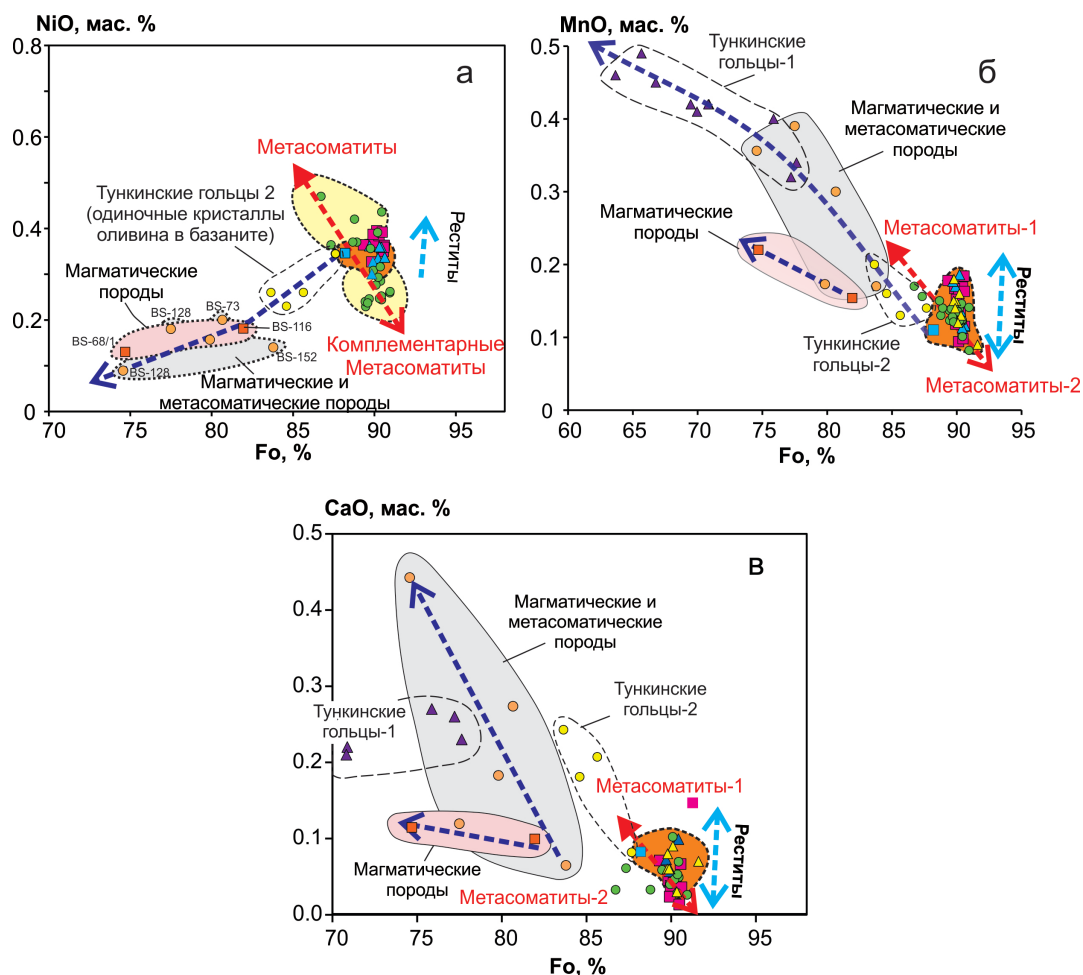


Рис. 7. Диаграммы NiO – Fo, MnO – Fo и CaO – Fo оливина глубинных нодулей из вулканических пород. Для оливина приняты усл. обозн. групп глубинных включений, представленных на рис. 5. На панелях а, б и в использованы данные по минералам глубинных включений из вулканических пород хр. Тункинские гольцы-1 [Расказов и др., 1989а, б] и новые данные [Аило и др., 2021а].

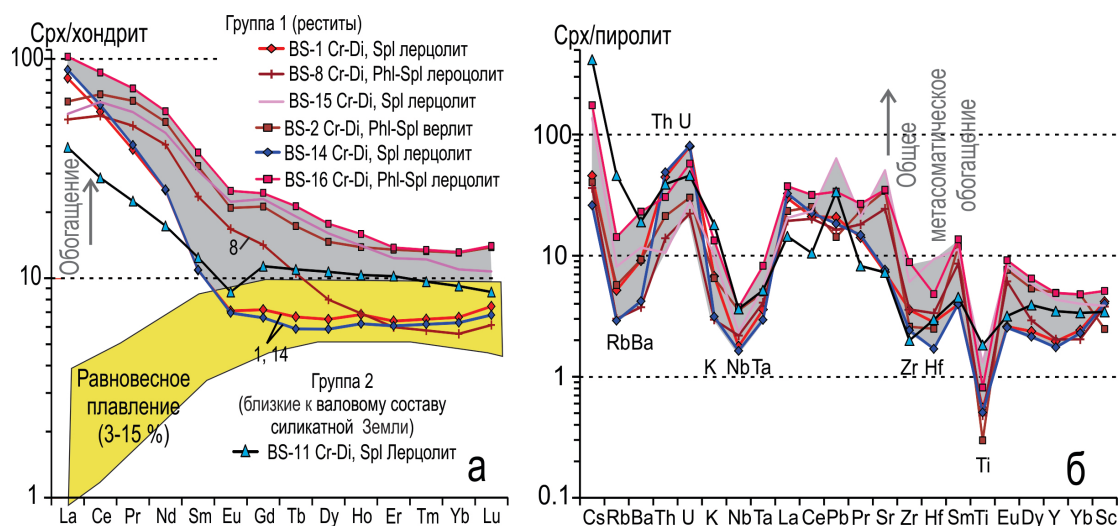


Рис. 8. Нормированное к хондриту распределения РЗЭ (а) и нормированное к пироклиту распределения несовместимых элементов (б) в клинопироксене из глубинных пород групп 1 и 2. На диаграмме а показан диапазон составов реститов, образующихся при равновесном плавлении пиролита [Li et al., 2014], на диаграмме б серым цветом показана область составов вторично обогащенных реститов, обогащенных несовместимыми элементами относительно шпинелевого лерцолита обр. BS-16-14. Для нормирования использованы составы хондрита и пиролита [McDonough, Sun, 1995].

Глава 6. РТ оценки глубинных пород

Данные по РТ условиям были получены для 70 нодулей шпинелевых, бесшпинелевых перидотитов, пироксенитов, габброидов и микропироксенолитов из вулканических пород вулкана Карьерный. Расчеты температуры по клинопироксеновому геотермометру [Ashchepkov et al., 2010] показали хорошую сходимость с результатами расчетов по двупироксеновым геотермометрам, поэтому в последующем изложении материалов температурные оценки этого геотермометра принимаются как основные, а для расчета давления результаты принимаются по методу [Ashchepkov et al., 2017].

Для глубинных пород получено два тренда: один – с существенным изменением температуры при слабом изменении давления, другой – с существенным изменением давления при слабом изменении температуры (рис. 9). Первый тренд соответствует РТ-условиям при литостатическом давлении, второй обозначает избыточное давление.

Тренду литостатического давления в коре соответствуют в основном фигуративные точки группы 5, распределяющиеся вдоль кондуктивной геотермы 120 мВ/м² при низких давлениях (около 0.4–1.0 ГПа). Подобные высокотемпературные кондуктивные геотермы характеризуют литосферу рифтов [Mercier, 1980]. Этой же геотерме удовлетворяют точки габброидов и микропироксенолитов. Положение геотермы в области низких давлений (P=0.39–1.18 ГПа, T=492–994 °C) трассируется точками большинства пород группы 5 и частично точками пород группы 4. Высокую температуру (T=1042 °C) показал расчет по одному из составов клинопироксена обр. 10 группы 1, что, как и в случае габброидов и микропироксенолитов, может отражать повышенную температуру равновесной кристаллизации ультраосновного магматического расплава во вмещающих лерцолитах на глубине. Низкие температуры при низком давлении получены для фассаитового пироксенита BS-16-73 и пироксенита BS-16-88 (соответственно, T=550 °C, P=0.43 ГПа, и T=492 °C, P=0.39 ГПа).

По данным [Васильев et al., 1981], в гранулитовой фации Слюдянского кристаллического комплекса определено максимальное давление 0.9 ГПа при температуре 800 °C. Эти параметры близки к переходу от шпинель–пироксеновой к оливин–плаггиоклазовой фации перидотитов (около 1.0–1.1 ГПа [Koga et al., 1999]) и соответствуют условиям (T=821 °C, P=0.9 ГПа), которые реконструируются для пироксенитов группы 5 смешанного метасоматического и магматического генезиса. Под Быстринской зоной по распределению групп пород на РТ-диаграмме (рис. 9) и с учетом отсутствия в них граната (но выплавления базальтовых магм, излившихся в Тункинской долине из источников, содержащих гранат [Расказов и др., 2013]), выделяются слои: 1) слой гранулитов Слюдянского метаморфического блока, 2) слой, представленный в основном породами группы 5 с рассчитанным интервалом низкого давления (P=0.4–1.0 ГПа) (авгитовые, салитовые, диопсидовые и фассаитовые пироксениты, плаггиоклазовые пироксениты, габброиды и микропироксенолиты), 3) слой преимущественно пород групп 1–3 с повышенным (избыточным) давлением (от 1.0 до 2.4 ГПа) (перидотиты и пироксениты) и 4) слой подстилающих реститовых гранатовых перидотитов (источники извергнутых вулканических пород) (рис. 10).

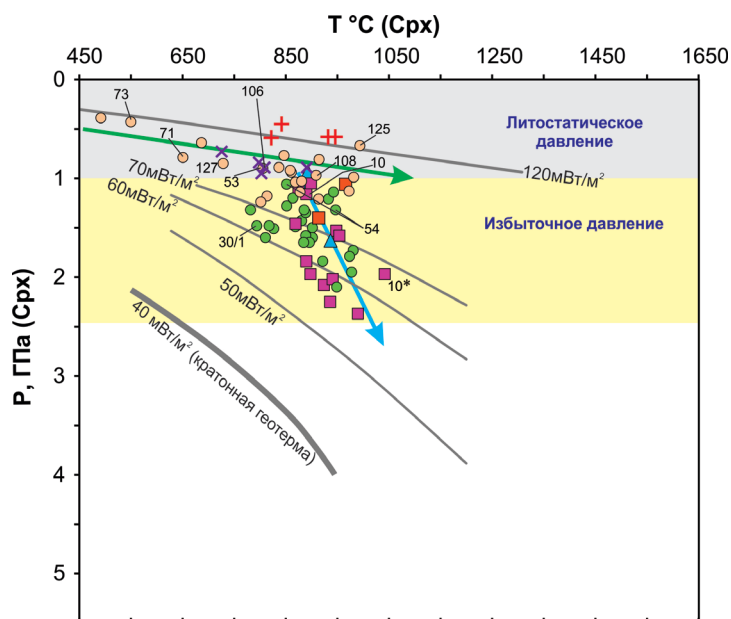


Рис. 9. P-T-диаграмма глубинных нодулей из пород Карьерного вулкана. Для групп используются усл. обозн. рис. 5. Использованы барометр [Ashcherkov et al., 2017] и термометр [Ashcherkov et al., 2010]. Кондуктивные геотермы показаны по работе [Pollack, Chapman, 1977]. Кратонная геотерма 40 мВт/м² из работы [Ashcherkov et al., 2017], геотерма 120 мВт/м² – из работы [Hasterok et al., 2011], другие геотермы – из работы [Goncharov, Ionov, 2012]. 10* – результаты повторных измерений. Зеленой линией со стрелкой показан тренд, соответствующий тренду глубинных пород рифтов [Mercier, 1980], синей линией со стрелкой – тренд избыточного давления, пересекающий кондуктивные геотермы.

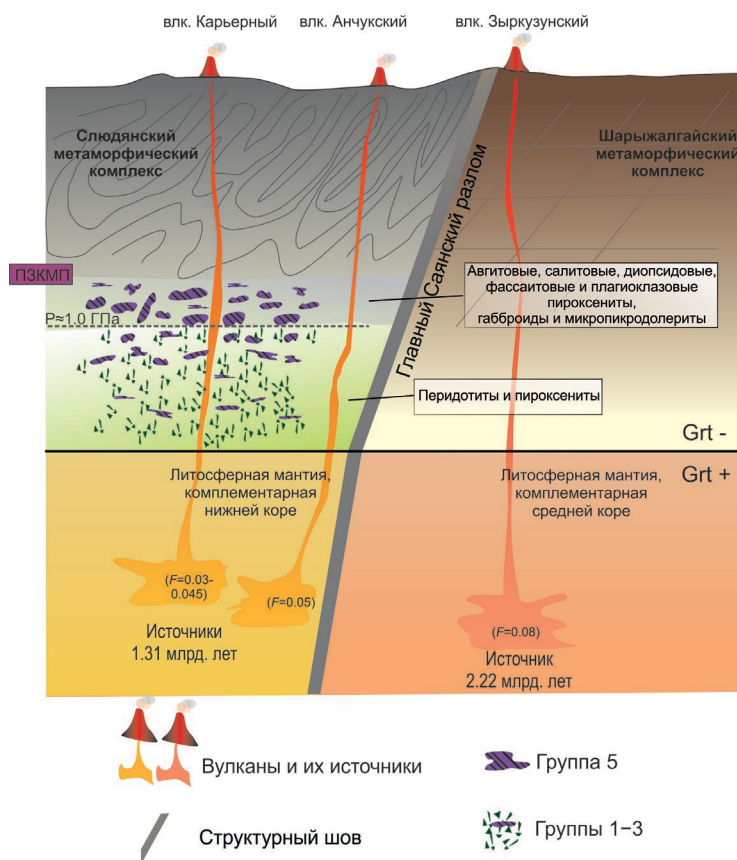


Рис. 10. Схема слоев литосферы под Быстринской вулканической зоной. ПЗКМП – петрологическая зона коромантийного перехода. Область коромантийного перехода включает слои: гранулитов, ассоциации пород основного-ультраосновного состава группы 5 (SiO_2 43.81–51.98 мас. %), ассоциации пород основного-ультраосновного состава групп 1–3 (SiO_2 группы 1 – 43.34–45.28 мас. %, группы 2 – 45.53 мас. %, группы 3 – 49.51–54.75 мас. %) и гранатосодержащих реститов источников извергнутых вулканических пород.

Тренд повышенных давлений объясняется, исходя из распространения в породах группы 3 прожилковых и контактовых образцов, которые свидетельствуют о хрупких деформациях пород, претерпевших метасоматоз с перераспределением Si (см. рис. 5). Из деформированного субстрата вместе с кремнием мигрировало железо. Метасоматические FeSi компоненты комплементарно перераспределялись из глубинных пород, испытавших хрупкие деформации с разрывами, в породы–концентраторы этих компонентов. Подобная тесная связь между Fe и Si была установлена в источниках вулканических пород Култукского вулкана и источниках псевдотахилитов, образовавшихся в результате развития косейсмических процессов в коровых очагах землетрясений [Rasskazov et al., 2021]. Ряд глубинных нодулей «метасоматит с высокими отношениями Mg(Fe)/Si и Al/Si → метасоматит с низкими отношениями Mg(Fe)/Si и Al/Si → метасоматит+магматит» служит еще одним свидетельством развития процессов синкинематического перераспределения Si и Fe в области коромантийного перехода.

Соответственно, повышенное давление в сложных деформированных образцах отразило избыточное давление, которое было следствием концентрации тектонических напряжений в хрупких породах. Как следствие, синкинематическое возрастание давления в этих породах повлекло за собой изменения барофильных компонентов клинопироксена. Из полного взаимного перекрытия фигуративных полей глубинных пород групп 3 и 1 на PT-диаграмме следует, что тектонические напряжения, вызывавшие избыточное давление, концентрировались в литологически индивидуализированном слое перидотитов и пироксенитов.

Глава 7. Обсуждение особенностей химического и минерального состава глубинных пород

Особенности глубинного петрогенезиса в корневой части Слюдянского метаморфического блока, активизированного в кайнозой, заключаются: в менее глубоком происхождении глубинных нодулей из вулканических пород по сравнению с глубинными породами Витимского и Окинского плоскогорий. Полигенетическая малоглубинная специфика включений из вулканических пород Тункинской долины подчеркивается при сравнительном анализе их валового состава (и входящего в них оливина) с валовым составом глубинных включений (и порообразующих минералов) из вулканических пород Витимского и Окинского плоскогорий, представляющих ассоциацию пород более глубинного перехода от шпинель-пироксеновой к гранатовой фации перидотитов [Аило и др., 2021a].

В PT-параметрах глубинных нодулей из пород вулкана Карьерный обозначаются две ветви тренда, одна соответствует высокой (рифтовой кондуктивной геотерме), другая пересекает низкие кондуктивные геотермы. Такое сочетание PT-ветвей отличается от PT-трендов глубинных нодулей из вулканических пород Витимского и Окинского плоскогорий, характеризующих кондуктивные геотермы. Тренд избыточного давления в корневой части метаморфического блока под вулканом Карьерный рассматривается как особенность области коромантийного перехода.

Глава 8. Геохимические характеристики вулканических пород Западного Прибайкалья и Сирии как показатели источников деламинарованной континентальной литосферы

В кайнозой литосфера Западного Прибайкалья испытывала деформации в обстановке сочетания сжатия Центрально-Азиатской орогенной системы с растяжением в Байкальской рифтовой системе. В восточной части Тункинской долины действовали вулканы Камарско-Становой зоны горячей трансенсии во временном интервале с 18 до 12 млн лет назад. Последующее сжатие литосферы выражено не только в угасании вулканизма, но и в инверсионном поднятии территории, а также распространении молодых надвигов [Рассказов и др., 2010a; Rasskazov et al., 2021].

Подобно территории Западного Прибайкалья, на территории Сирии пространственно сочетаются структуры сжатия и растяжения литосферы с развитием сдвиговой тектоники. Исследуемая территория расположена в северном дугообразном выступе складчатого пояса Загрос, контур которого подчеркивается развитием одноименной взбросовой зоны. В Западной Сирии находится Габская впадина, принадлежащая северной части системы разломов Мертвого моря (СРММ), известной как Левантийская, а также как Восточно-Средиземноморская рифтовая зона. СРММ простирается от сочленения с Восточно-Анатолийским разломом на юго-востоке Турции (подножье гор Тавра) до сочленения с разломом Красного моря (залив Акаба). Система разломов Мертвого моря соответствует северной окраине Восточно-Африканской рифтовой системы, расположенной вблизи фронта столкновения континент–континент Аравийской плиты и Евразии и граничит с Альпийской складчатой областью. Активизация вулканизма Западной Сирии связывается с проявлением трансенсионных условий развития вулканизма в деформационном поле конвергентного взаимодействия Аравийской плиты и Евразии, с образованием СРММ, которое, в свою очередь, сочетается с открытием Красного моря между Аравийской и Африканской плитами [Brew et al., 2001a,б].

На диаграммах Th/Yb – Ta/Yb (рис. 11), Na₂O+K₂O – SiO₂ и (La/Yb)_n – (Yb)_n выявляется сходство источников вулканических пород Западного Прибайкалья и Западной Сирии, для которых характерно сочетание коровых и реститовых мантийных компонентов магматических расплавов.

Учитывая характер тектонического развития территории в конце мезозоя и кайнозое, компонентный состав излившихся мантийных расплавов Западного Прибайкалья интерпретируется в рамках модели деляминации утолщенной литосферы [Кай, Кай, 1993; Elkins-Tanton, 2005]. Предполагается, что вследствие мел-палеогенового орогенеза [Рассказов, Чувашова, 2018; Аль Хамуд и др., 2019; Rasskazov et al., 2021] вместе с корой утолщалась мантийная часть литосферы. В результате трансенсии утолщенная часть литосферы подвергалась деляминации и погружалась в астеносферу, вызывая горячий противопоток, который обеспечил плавление мантийного основания разновозрастной литосферы в зоне трансенсии. Реальность модели деляминации с погружением в астеносферу плотного литосферного блока подтверждается наличием такого блока и низкоскоростной линзы над ним под Восточным Хангаем в скоростной модели S-волн профиля MOBAL-2003 [Мордвинова и др., 2007] и соответствующим проявлением тренда нижняя кора – рестит на диаграмме Th/Yb – Ta/Yb вулканических пород территории [Рассказов и др., 2012].

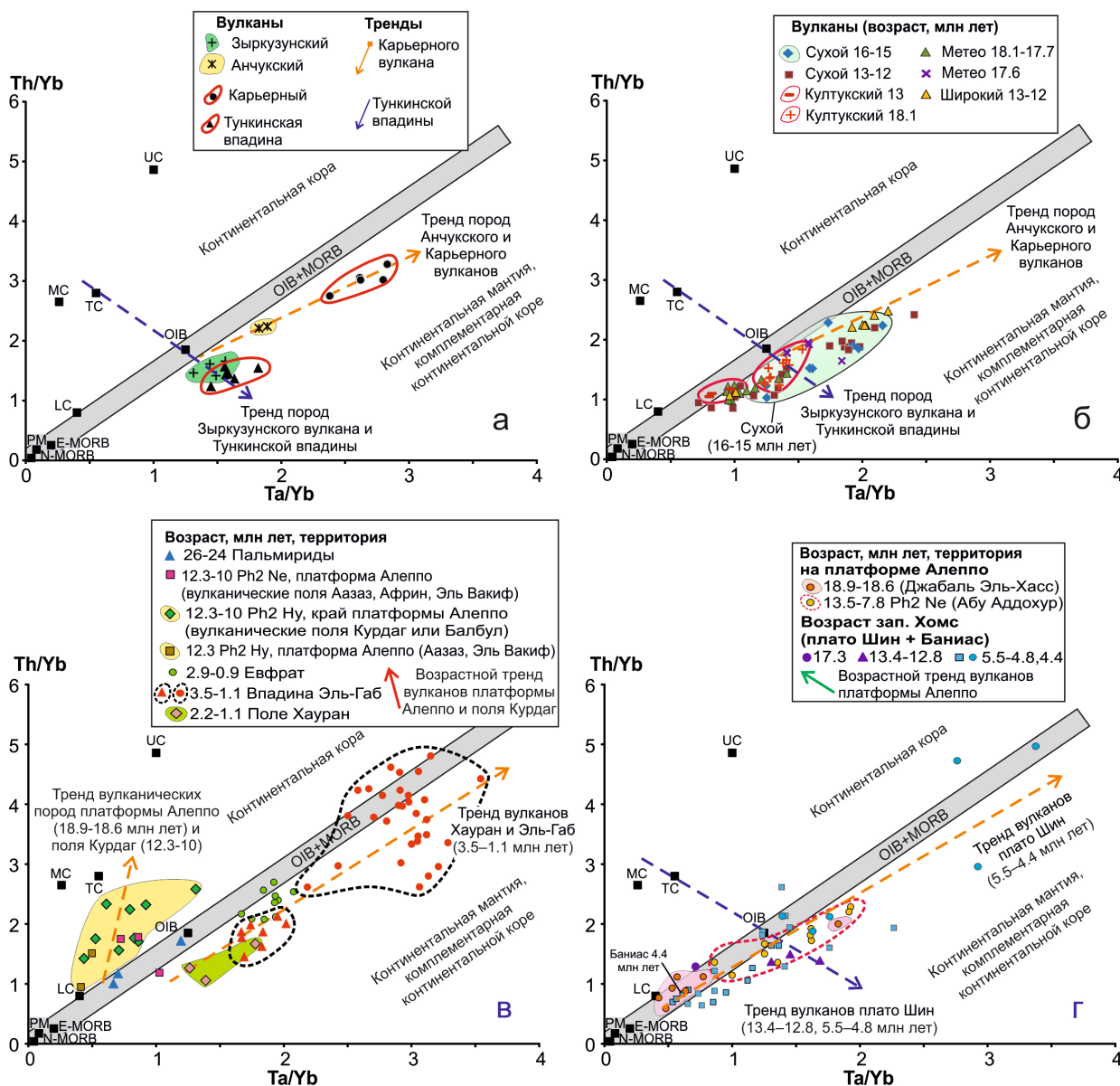


Рис. 11. Тренды компонентов континентальной мантии и коры на диаграмме Th/Yb – Ta/Yb вулканических пород Западного Прибайкалья и Тункинской долины (а, б) и Сирии (в, г). Используются данные авторов и работ [Lustrino, Sharkov, 2006; Krienitz et al., 2006; Ma et al., 2013]. Обобщенные тренды показаны штриховыми линиями со стрелками (объяснения в тексте). Составы E-MORB, N-MORB и OIB показаны по работе [Sun, McDonough, 1989], составы нижней коры (LC, lower crust), средней коры (MC, middle crust), верхней коры (UC, upper crust) и общего состава коры (TC, total crust) показаны по работе [Rudnick, Fountain, 1995].

Подобная модель применима для вулканических пород Сирии, образующих на диаграмме Th/Yb – Ta/Yb тренды нижняя кора – рестит и средняя (валовая) кора – рестит. В этой модели погружение деламинарованного блока под Камарско-Становой зоной транстениции инициирует горячий противопоток, обеспечивший плавление мантийного основания литосферы на границе террейнов возрастом 2.22 и 1.31 млрд лет. Возраст источников определен по Rb-изотопным данным [Rasskazov et al., 2021]. Расчет по изотопным отношениям Rb вулканических пород Сирии также обнаруживает латеральное изменение возраста источников от ~3.3 млрд лет в Северо-Восточной Сирии до 1.86 млрд лет в Западной Сирии. Вулканические породы первой территории не выходят за пределы состава ELMU (elevated μ), на второй территории – перекрывают составы ELMU и HIMU (elevated, high μ).

Таким образом, вулканические породы Западного Прибайкалья и Сирии имеют сходные геохимические характеристики источников, свидетельствующие о сходных механизмах глубинного магмообразования. Деламинация литосферы Западного Прибайкалья, получившая развитие при переходе от Южно-Байкальской впадины к инверсионной части Тункинской долины, подтверждается данными сейсмической томографии. Деламинация литосферы Сирии предполагается пока только по геохимическим характеристикам вулканических пород [Аило и др., 2022].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глубинные нодулы из вулканических пород восточной части Тункинской долины подразделены на пять групп: 1) вторично обогащенные реститы, 2) вторично обогащенные лерцолиты, близкие по составу к первичному составу силикатной Земли, 3) метасоматиты, 4) магматические породы, комплементарные реститам и 5) породы смешанного магматического и метасоматического генезиса. Показана специфика вариаций состава оливина, клинопироксена, хромшпинели, биотита, амфибола и полевых шпатов глубинных пород. Подчеркнута особенность корневой части зоны метаморфического блока, которая заключается в латеральных вариациях окисленности–восстановленности железа в клинопироксенах и других железо-магнезиальных минералах и относительно малая глубина ассоциации нодул области перехода от шпинель-пироксеновой к оливин-плаггиоклазовой фации перидотитов.

Глубинные нодулы из вулканических пород Карьерного вулкана рассмотрены как породы корневой части Слюдянского метаморфического блока, активизированной в кайнозой. Вулкан находится в зоне гранулитовой фации метаморфизма. По глубинным нодулам выделены слои коромантийного перехода, в верхней части которого находятся авгитовые, салитовые, диопсидовые, фассаитовые и плаггиоклаз-содержащие пироксениты, а в нижней части – шпинелевые перидотиты и пироксениты. По геохимическим характеристикам источников вулканических пород обозначен более глубокий слой подкоревой мантии гранатовых реститовых перидотитов, комплементарных компонентам нижней и средней континентальной коры.

Выполненное сопоставление вулканических пород Западного Прибайкалья в Тункинской долине и вулканических пород Западной Сирии показало геохимическое сходство источников реститового типа, комплементарных материалу средней (валовой) и нижней континентальной коры. Это сходство обусловлено развитием вулканизма обеих территорий в обстановках сочетания процессов орогенеза и рифтогенеза с деламинацией литосферы.

Список публикаций по теме диссертации:

Статьи в журналах списка ВАК и международного журнала:

Аило Ю., Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А. Соотношения пород примитивной мантии, реститов и метасоматитов во включениях базанитов вулкана Карьерный (Западное Прибайкалье) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 27. С. 3–23.

Аило Ю., Рассказов С. В., Чувашова И. С., Ясныгина Т. А. Оливин как показатель полигенетической ассоциации включений в позднекайнозойских вулканических породах Тункинской долины, Байкальская рифтовая зона // Литосфера. 2021а. Т. 21, № 4. С. 517–545.

Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // Minerals. 2021. V. 11. No. 5. P. 487.

Статьи в других журналах:

Аило Ю., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Сие Чжэньхуа, Сунь Йи-минь Базальты Быстринской зоны из источников континентальной литосферной мантии: Тункинская долина Байкальской рифтовой системы // Геология и окружающая среда. 2021б. Т. 1, № 1. С. 38–53.

Аило Ю., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С. Геохимические характеристики вулканических пород Западного Прибайкалья и Сирии как показатели источников деламинированной континентальной литосферы // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 24–41.

Другие опубликованные работы:

Аило Ю., Рассказов С.В., Чувашова И.С. Глубинные включения из познекайнозойских базальтов Тункинской долины: вероятная связь с породами слюдянского кристаллического комплекса // Вестник ИГУ, Иркутск. 2016. Вып. 19. С. 82–84.

Рассказов С.В., Аило Ю., Сунь Йи-минь, Сие Чжэньхуа, Янг Чэнь, Чувашова И.С. Финальные извержения в центральной части Байкальской рифтовой системы в контексте вулканических событий Азии // Евразия в кайнозое. Стратиграфия, палеоэкология, культуры. 2016. Вып. 5. С. 19–27.

Аило Ю., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Рассказов С.В. Перидотитовые мантийные включения из миоценовых базальтов западного побережья оз. Байкал // Вестник ИГУ. Иркутск: Изд-во ИГУ. 2017. С. 71–73.

Аило Ю., Ясныгина Т. А., Чувашова И. С. Вариации состава вулканических пород Быстринской зоны, Тункинская долина Байкальской рифтовой системы // XXVII Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» с участием исследователей из других стран. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 22–28 мая 2017. С. 24–25.

Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Мордвинова В.В., Аило Ю. Зональность источников вулканизма 18–12 млн лет назад в литосфере Хамардабанского террейна, расплющенного у края Сибирского кратона: интерпретация VS-разреза // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы совещания. Выпуск 15. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2017. С. 210–212.

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Мордвинова В.В., Хритова М.А., Аило Ю. Камарско-Становая и Центрально-Монгольская горячие зоны трансенсии: сравнительный анализ скоростных разрезов S-волн и источников позднекайнозойских расплавных аномалий // V Всероссийская научно-практическая конференция Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии, 27–31 августа. Улан-Удэ, 2018. С. 398–400.

Аило Ю., Чувашова И.С. Оливины из глубинных включений среднемиоценовых базальтов западного побережья оз. Байкал как показатели преобразования мантии при ее частичном плавлении и кристаллизации пород из расплава // Строение литосферы и геодинамика. Тезисы XXVIII Всероссийской молодежной конференции. г. Иркутск, ИЗК СО РАН, 8–14 апреля 2019 г. С. 9–10.

Аило Ю., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С. Вариации состава оливинов глубинных включений позднекайнозойских вулканитов Тункинской долины в сопоставлении с оливинами включений вулканитов других местонахождений юга Сибири // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: мат-лы VI Всероссийской с международным участием конференции. Иркутск: изд-во Оттиск, 2019. С. 8–11.

Аило Ю., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С. Геохимические характеристики источников вулканических пород деламинированной литосферы в западном Прибайкалье и Сирии // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы. Мат-лы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения Н.А. Логачева. Иркутск, ИЗК СО РАН, 14–15 октября 2019 г. С. 12–17.

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Аило Ю. Сходство и различие трансляции магматических эффектов в трансенсионном сегменте Вонджи Эфиопской зоны Восточно-Африканской рифтовой системы и в Витимо-Удоканской зоне трансенсии Байкальской рифтовой системы // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы. Мат-лы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения Н.А. Логачева. Иркутск, ИЗК СО РАН, 14-15 октября 2019 г. С. 155–156.

Yasnygina T., Rasskazov S., Ailow Y., Chuvashova I., Saranina E., Mordvinova V., Khritova M. Accommodation of the Cenozoic Tunka Rift Valley at the Ordovician Slyudyanka Collision Zone: insight into volcanic sources, deep-seated inclusions, and seismic tomography models// EGU General Assembly 2020. Geophysical Research Abstracts. 2020. EGU2020-19714. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-19714>

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ильясова А.М., Ясныгина Т.А., Аило Ю., Иванова В.Н. Генерация расплавных аномалий в Култукском структурном сочленении и проявление сильных землетрясений в западной части Южно-Байкальской впадины Байкальской рифтовой системы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Мат-лы совещания. Вып. 18. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2020. С. 287–289.

Аило Ю., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С. Находка Fe–Si включений в глубинных нодулях из трахибазальтов вулкана Карьерный (Тункинская долина Байкальской рифтовой системы) и ее значение для понимания происхождения железистых кварцитов события Великого Окисления // XIII Всероссийское петрографическое совещание (с участием зарубежных ученых) «Петрология и геодинамика геологических процессов». 06–13 сентября. Иркутск: ИГХ СО РАН и ИЗК СО РАН, 2021. С. 18–23.

Путеводитель Южно-Байкальской экскурсии «Породы юга Восточной Сибири». XIII Всероссийское петрографическое совещание (с участием зарубежных ученых) Петрология и геодинамика геологических процессов / Составители: Левицкий В.И., Левицкий И.В., Рассказов С.В., Аило Ю., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В. Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, 2021. 101 с.

Rasskazov S., Chuvashova I., Saranina E., Yasnygina T., Ailow Y. Crustal versus mantle events of 2.44–2.22 and 1.63–1.31 Ga at the junction between Khamardaban terrane, Tuva-Mongolian microcontinent, and Siberian paleocontinent: Petrogenetic consequences // EGU General Assembly 2022. Geophysical Research Abstracts. 2022. EGU2022-6686. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-6686>