

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 550.42:546.027
Рег. № НИОКТР АААА-А17-
117061610019-3

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИГХ СО РАН,
д.г.-м.н.
_____ А.Б. Перепелов
«___» _____ 2019 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
Процессы мантийно-корового взаимодействия и изотопно-геохимические
индикаторы рециклирования элементов
по теме:
ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА МАНТИЙНО-
КОРОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ОБСТАНОВКАХ
(промежуточный)

Приоритетное направление IX.129. Закономерности формирования минерального, химического и изотопного состава Земли. Космохимия планет и других тел Солнечной системы. Возникновение и эволюция биосферы Земли, биогеохимические циклы и геохимическая роль организмов.

Шифр программы: XI.129.1.
Шифр темы: 0350-2016-0028

Научный руководитель темы
чл.-к. РАН

_____ В.С. Шацкий
подпись, дата

Иркутск 2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, член-
корр. РАН

подпись, дата

В.С. Шацкий

Ответственные исполнители темы:

член-корр. РАН

подпись, дата

В.С. Шацкий (раздел 1)

кандидат геолого-минералогических
наук

подпись, дата

С.И. Дриль (раздел 2)

Реферат

Отчет включает 34 стр., 10 илл., 52 ист., приложений 3.

Ключевые слова: плюмтектоника, изотопно-геохимические индикаторы, высокобарные метаморфические комплексы, эклогиты, магматические процессы, континентальный рифтогенез, генезис базальтов

Проведены изотопно-геохимические исследования эклогитов Кокчетавского массива и юго-западной Монголии. Эклогиты Кокчетавского массива демонстрируют значительные вариации в содержаниях ряда несовместимых элементов, а также изотопных отношениях Nd ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - 0.512163-0.513180$) и Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - 0.70393-0.78447$). Эклогиты Сулу-Тюбе имеют изотопно-геохимические характеристики близкие к N-MORB, в то же время эклогиты других участков по этим характеристикам близки к E-typeMORB или базальтам островных дуг (IAB). Модельный возраст $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$ эклогитов варьирует от 1,95 до 0,67 млрд.л. Наиболее молодой модельный возраст имеют эклогиты Сулу-Тюбе, которые так же характеризуются значениями $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) (+7,2)$ и отношениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ близкими к деплитированной мантии. На графиках в координатах $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) - ^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) - \text{T}$ эклогиты образуют тренды от деплитированной мантии к вмещающим породам. Это свидетельствует о контаминации протолитов эклогитов коровым материалом.

Эклогиты юго-запада Монголии показывают относительно узкий интервал колебаний значений $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ и модельного возраста (1,47-1,77 млрд.л.). В то же время характеризует большой интервал вариаций отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{T}) (0,6883-0,7176)$. Изотопный состав кислорода гранатов лежит в интервале +5,5 - +6,6 и указывает на взаимодействие протолитов эклогитов с морской водой. Изотопно-геохимические особенности эклогитов свидетельствуют о том, что в качестве протолитов эклогитов выступали низкокалиевые толеиты континентальной окраины близкие к T-типу MORB.

Наиболее масштабным событием внутриплитной эндогенной активности в пределах Сибирского палеоконтинента в фанерозойское время было синхронное формирование Сибирских траппов и Западно-Сибирской рифтовой системы на рубеже перми и триаса. Оно было связано с деятельностью Исландского плюма, принадлежащего к Пра-Африканскому горячему полю мантии. Завершающие этапы эндогенной активности, связанной с Пра-Африканским горячим полем мантии, стали позднемезозойские рифтогенные внутриплитовые вулканические образования Центрально-Азиатского орогенного пояса. Для пермо-триасовых вулканитов Сибирских траппов и Западно-Сибирской рифтовой системы была выявлена существенная гетерогенность системы источников вещества внутриплитовых

базальтоидов. В формировании основных пород первой магматической провинции принимали участие источники MORB, PREMA и верхней коры, а для второй было обосновано дополнительное влияние источника HIMU. Формирование базитовых расплавов, исходных для раннемеловых трахиандезибазальтов Нилгинской депрессии, также как и других рифтогенных базальтоидов позднепалеозойского-мезозойского возраста Центрально-Азиатского орогенного пояса, происходило за счет частичного плавления мантийных пород, в образовании которых принимали участие расплавы из умеренно истощенного источника PREMA и обогащенного источника EM-II. Таким образом, показано, что в течение позднепалеозойского – позднемезозойского времени под влиянием Пра-Африканского горячего поля мантии генерировались базальтовые расплавы, связанные с источниками MORB и PREMA при эпизодическом участии источника EM-II, HIMU и верхнекорового компонента.

Содержание

Введение	6
Основная часть	8
Раздел 1. Изотопно-геохимические исследования эклогитов из метаморфических комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса.	8
1.1. Петрология и изотопная геохимия эклогитов субдукционно-коллизийных зон Кокчетавского массива.	8
1.2. Петрология и изотопная геохимия эклогитов субдукционно-коллизийных зоны комплекса Алаг-Хадны (ЮЗ Монголия).	16
Раздел 2. Исследование Sr-Nd-O-Pb изотопной систематики внутриплитовых вулканитов южного складчатого обрамления Сибирского кратона для реконструкции источников вещества мантийных расплавов, связанных с деятельностью Пра-Африканского суперплюма.	21
2.1. Изотопная Pb-Sr изотопная систематика внутриплитных пермо-триасовых вулканитов Западно-Сибирской рифтовой системы Сибирской трапповой провинции.	21
2.2. Изотопные Sr-Nd характеристики позднемезозойской трахибазальтовой серии Центрально-Азиатского орогенного пояса на примере Нилгинской депрессии (Монголия)	24
Заключение	28
Список использованных источников	31
Приложение 1. Количество статей, опубликованных по тематике проекта в течение 2018 г. в соответствии с государственным заданием.	34
Приложение 2. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2018 г. в соответствии с государственным заданием.	35
Приложение 3. Копия заданий для выполнения фундаментальных научных исследований по теме (проекту) в 2018 г.	36

Введение

Земная кора образовалась в процессе дифференциации примитивной мантии, поэтому процесс роста коры отражает природу и этапность процессов эволюции и дифференциации последней. В настоящее время появляется все больше изотопно-геохронологических свидетельств того, что масштабные тектоно-термальные события, происходившие в субконтинентальной мантии на протяжении более, чем двух миллиардов лет, и зафиксированные в поведении Re-Os изотопных систем сульфидов из шпинелевых и гранатовых лерцолитов региона Центральной Азии, уверенно коррелируются с этапами роста ювенильной континентальной коры, фиксируемых в Sm-Nd изотопных характеристиках гранитоидов и осадочных пород этого региона. Подобная корреляция свидетельствует о существовании постоянной и тесной взаимосвязи между процессами, протекающими в мантии и коре Земли.

Согласно плану работ в 2018 год с целью выявления изотопно-геохимических свидетельств мантийно-корового взаимодействия в различных геодинамических обстановках и определения масштабов этого процесса был проведен следующий комплекс исследований.

Проведены петрологические и изотопно-геохимические исследования эклогитов Кокчетавского массива и юго-западной Монголии. Для пород с помощью имеющихся геотермобарометров были определены P-T параметры равновесия. Проведено исследование микроэлементного состава эклогитов, позволившее выявить различные типы исходного протолита метаморфических пород. Выполнены Rb-Sr и Sm-Nd изотопные исследования эклогитов, что дало возможность судить о природе их первичных источников вещества.

В течение фанерозойского времени Сибирский палеоконтинент и структуры Центрально-Азиатского орогенного пояса находились под воздействием Пра-Африканского суперплюма (Кузьмин, Ярмолюк, Кравчинский, 2011), что привело к формированию разновозрастных и различных по составу магматических образований. Наиболее масштабным магматическим событием, связанным с активностью Пра-Африканского плюма в пределах Сибирского кратона и его складчатого обрамления, является синхронное формирование Сибирских траппов и Западно-Сибирской рифтовой системы на рубеже перми и триаса. Завершающий эпизод этой плюмовой активности в позднеюрское – раннемеловое время обусловил формирование обширного Восточно-Монгольского ареала внутриплитового магматизма, охватывающего систему рифтогенных впадин, протянувшуюся более, чем на 1500 км, из Восточной Монголии через Восточное Забайкалье в Восточное Приамурье. Проведенные исследования изотопного состава Sr, Nd, Pb и O в пермо-триасовых вулканитов Сибирской трапповой провинции и Западно-Сибирской трапповой системы, а также в вулканитах позднекайнозойской трахибазальтовой серии

пород Восточного Забайкалья позволяют пролить свет на некоторые особенности процессов формирования базальтоидных пород, формировавшихся под воздействием Пра-Африканского плюма.

Исследования микроэлементного состава пород осуществлялись в лаборатории геохимии изотопов ИГХ СО РАН с использованием масс-спектрометров ICP-MS ELEMENT-2 и ICP-MS NEXIONE-300D ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН. Анализ изотопного состава неодима, стронция и свинца пород выполнен в лаборатории геохимии изотопов ИГХ СО РАН с использованием многоколлекторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой NEPTUNE Plus ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН, а также многоколлекторного термоионизационного масс-спектрометра Finnigan MAT 262 ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

Основная часть отчета

Раздел 1. Изотопно-геохимические исследования эклогитов из метаморфических комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса.

1.1. Петрология и изотопная геохимия эклогитов субдукционно-коллизионных зон Кокчетавского массива.

Проведены изотопно-геохимические исследования эклогитов Кокчетавской субдукционно-коллизионной зоны из доменов высокого и ультравысокого давления, демонстрирующих большой диапазон в температурах равновесия (650-1000°C), вариациях минерального состава и степени амфиболитизации. Эксгумация эклогитов этих доменов включала как минимум две стадии. Породы западного блока были метаморфизованы в поле стабильности алмаза (участки Кумды-Коль, Барчинский). В то же время в породах восточного блока зафиксированы давления отвечающие стабильности коэсита (участки Кулет, Чаглинка, Сулу-Тюбе, Даулет, Боровое).

Все эклогиты, за исключением четырех образцов, демонстрируют обогащение легкими редкими землями относительно N-MORB при общем ровном распределении РЗЭ, нормированных на хондрит (Рис. 1). Некоторые эклогиты демонстрируют слабую Eu аномалию. На участках Кулет, Кумды-Коль и Барчинский встречаются эклогиты, претерпевшие этап частичного плавления в присутствии граната как реститовой фазы, о чем свидетельствует высокая величина отношения Sm/Nd (0.65-0.51) и низкие величины отношений La/Sm_N (0.34-0.58).

Температуры равновесия этих эклогитов больше 850°C, согласно геотермометру Эллиса и Грина (Ellis, Green, 1979) и больше 800°C, согласно геотермометрам Крог-Равны (Krogh-Ravna, 2000) и Накамуры (Nakamura, 2009).

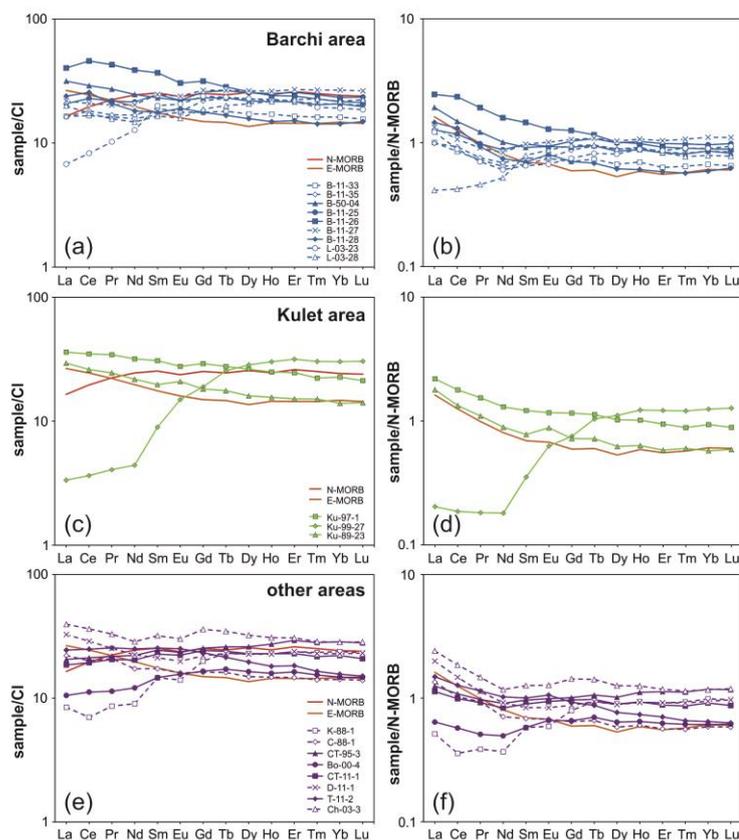


Рисунок 1. Нормированные к хондриту и среднему составу базальта N-MORB спектры распределения редкоземельных элементов эклогитов участков развития Барчи (Рис.1 а и b), Кулет (Рис. 1 с и d) и других (Кумды-Коль, Чаглинка, Сулу-Тюбе, Даулет, Боровое) (Рис. 1 е и f).

На мультиэлементных диаграммах (Рис.2), нормированных на N-MORB, эклогиты демонстрируют характер распределения несовместимых элементов, близкий к N-MORB, однако демонстрируют относительное обогащение крупноионными литофильными элементами, Zr, Hf, Nb и Th и положительную Pb аномалию. Эклогиты, имеющие характер распределения РЗЭ, близкий к N-MORB, на мультиэлементной диаграмме демонстрируют положительные аномалии по Ta, Zr и Hf. Эклогиты, деплетированные легкими РЗЭ, также характеризуются положительными пиками по Nb, Ta, Zr и Hf. У большинства эклогитов присутствует отрицательная аномалия по Sr. В то же время большинство образцов деплетированы относительно калия. Обогащенность крупноионными литофильными элементами демонстрируют так же образцы эклогитов Сулу-Тюбе. Полученные данные указывают на потенциальную контаминацию протолита эклогитов коровым компонентом, о чем свидетельствуют положительные аномалии по Pb у всех эклогитов и обогащенность легкими редкими землями. Разная степень обогащенности эклогитов легкими редкими землями свидетельствует о разной степени контаминации коровым компонентом.

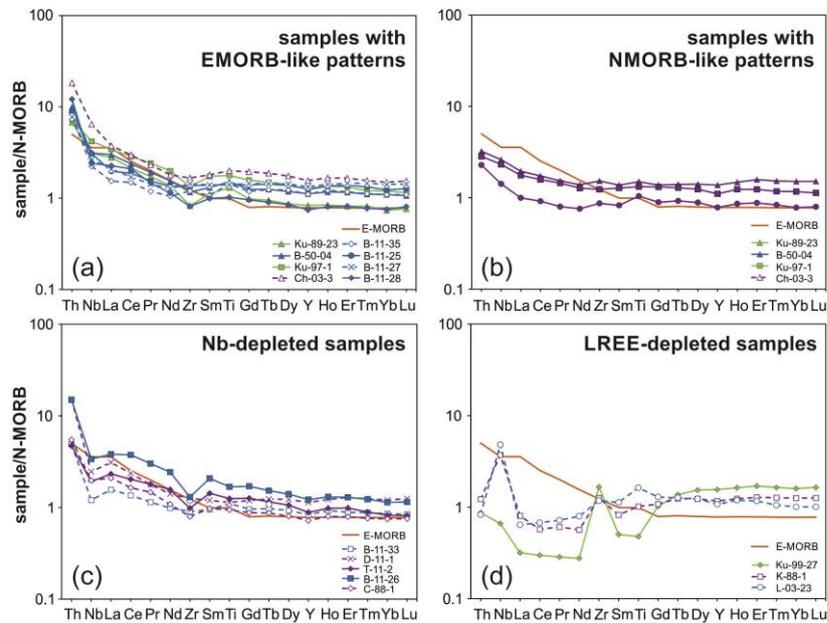


Рисунок 2. Мультиэлементные диаграммы для эклогитов различных геохимических типов из разных участков Кокчетавской субдукционно-коллизонной зоны.

Для эклогитов Кокчетавского массива характерен широкий диапазон отношений $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (0.1307-1.2189) и первичных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.70393-0.78447) (Рис. 3). В то же время, корреляции между значением $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и изотопным составом Sr не наблюдается. Эклогит участка Сулу-Тюбе (СТ-95-3) имеет первичное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, схожее с таковым базальтов типа N-MORB. Эклогиты характеризуются широким разбросом в значениях отношения $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ (0.367-0.143) и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.512163-0.513180) (Рис. 3). Рассчитанные на возраст метаморфизма значения $\epsilon_{\text{Nd}}(530)$ варьируют от -10.3 до $+8.1$. На диаграмме $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ эклогиты не показывают линейной корреляции, что обусловлено частичным нарушением Sm-Nd изотопной системы в результате УНР метаморфизма или различной природой мантийного источника для протолита разных эклогитов. Образцы с наиболее высоким содержанием легких РЗЭ имеют значения Sm/Nd выше чем в деплетированной мантии (DM). В то же время, значения $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ значительно ниже таковых для DM. Модельный возраст эклогитов (T_{DM}) находится в пределах 1.95-0.67 млрд. лет. Эклогит участка Сулу-Тюбе имеет наиболее молодой возраст при значениях $\epsilon_{\text{Nd}}(530)$ и первичного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ близких к деплетированной мантии. На графиках $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ - $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ - T_{DM} состав эклогитов следует трендам, которые можно интерпретировать как результат контаминации протолита коровыми породами. Тренды изменения состава эклогитов на графиках в координатах $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ - Mg# и $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ - SiO₂ предполагают ассимиляцию древнекорового субстрата, который, по данным предыдущих изотопных исследований (Shatsky et al. 1999), может быть представлен вмещающими эклогиты породами Кокчетавского массива.

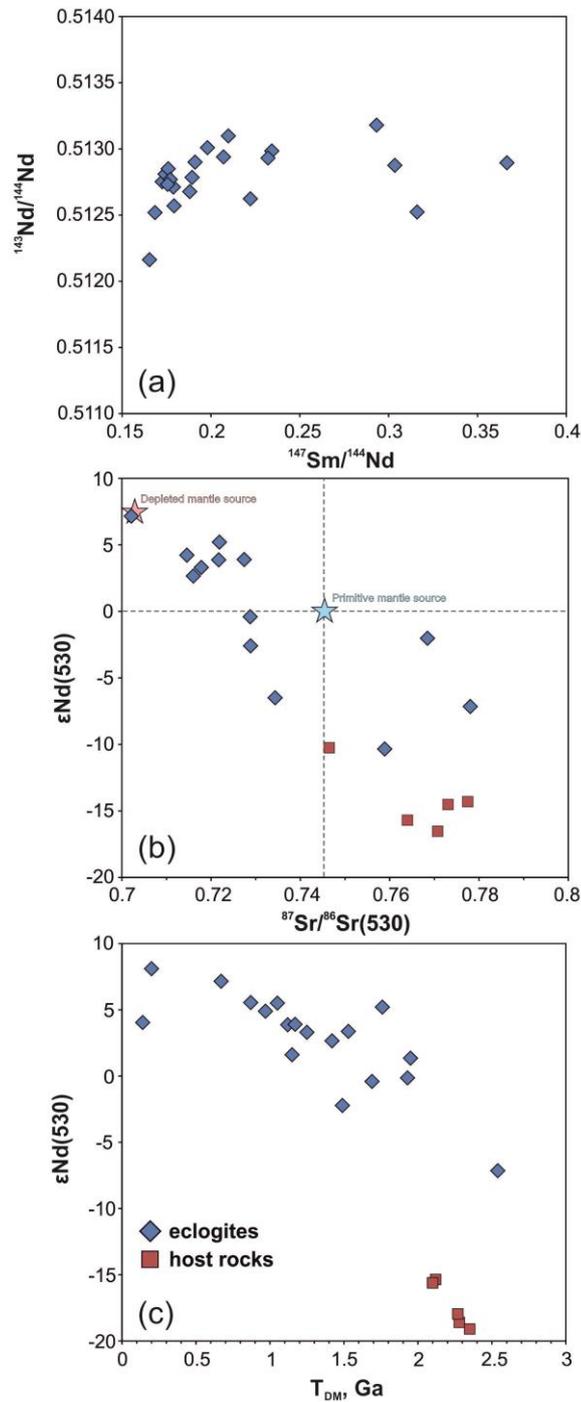


Рисунок 3. Диаграммы зависимости $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ (a); $\epsilon\text{Nd}(T)$ - $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ (b); $\epsilon\text{Nd}(T)$ - $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ (c) и $\epsilon\text{Nd}(T)$ - $T(\text{DM})$, для эклогитов и вмещающих пород Кокчетавского массива.

Геохимическими и изотопными исследованиями было показано, что эклогиты демонстрируют широкий диапазон содержаний и типов распределения несовместимых элементов, а также изотопного состава Nd и Sr. Эклогиты участка Сулу-Тюбе имеют характеристики базальтов N-MORB, тогда как для остальных участков характерны эклогиты с протолитом типа E-MORB или островодужных базальтов. Подобные вариации могут быть результатом частичного плавления гетерогенной субконтинентальной литосферной мантии

(Jourdan et al., 2007, 2009) или контаминации расплавов с источником типа MORB (в обстановке плюма или COX) при их прохождении через субконтинентальную литосферу (Neumann et al., 2011). В случае эклогитов Кокчетавского массива, образец СТ-95-3 с геохимическими характеристиками N-MORB можно рассматривать как неконтаминированный тип протолита. Добавление 15% корового субстрата, аналогичного по составу вмещающим гранито-гнейсам с высоким содержанием Nd (до 65 ppm) и низким $\epsilon_{Nd}(T)$ (Shatsky et al., 1999) приводит к составу эклогита К-88-1 с $\epsilon_{Nd}(530)$ равным -10. Для остальных эклогитов количество ассимилированной коры не превосходит 7%. Добавление 15% фельзического компонента (71 вес. % SiO_2) к протолиту эклогита (46 вес. % SiO_2) должно вызвать рост содержания до 50 вес. % SiO_2 , тогда как все изученные эклогиты имеют содержание SiO_2 в диапазоне 52.4-45%. Таким образом, мы можем предполагать контаминацию расплавов коровым материалом, однако не можем исключать возможность плавления субконтинентальной литосферы, контаминированной корой в процесс докембрийской субдукции. На основании полученных изотопно-геохимических характеристик, протолит эклогитов был сформирован при взаимодействии расплавов типа N-MORB и континентальной литосферы, что может соответствовать обстановкам континентальных окраин с базальтами разных типов MORB (Fodorand, Vetter, 1984). Таким образом, в Кокчетавском массиве присутствуют эклогиты с геохимическими особенностями базальтов N-MORB и базальтов пассивных континентальных окраин. Это может объясняться либо контаминацией континентальной корой базальтов, имеющих мантийный источник аналогичный N-MORB, либо совмещением в зоне субдукции базальтов океанической коры и континентальной окраины.

С учетом полученных данных, в частности близости геохимических характеристик порфиробластовых эклогитов участка Сулу-Тюбе к базальтам N-MORB, нами проведены более детальные минералого-геохимические исследования эклогитов разных структурных типов данного участка. Было отобрано пять образцов порфиробластовых эклогитов, слагающих крупное тело (1.5 км x 0.5 км x 0.5 км) среди слюдяных сланцев и гнейсов, и 6 среднезернистых эклогитов, образующих отдельные тела в юго-западной сопки Сулу-Тюбе. С целью изучения поведения несовместимых элементов в процессе регрессивного метаморфизма исследовался образец амфиболита по порфиробластовому эклогиту (Ст-84-45). У всех образцов были определены содержания главных и редких элементов. С целью уточнения P-T параметров метаморфизма эклогитов разных структурных типов у двух образцов порфиробластовых эклогитов и двух среднезернистых эклогитов определен состав минералов и рассчитаны температуры равновесия.

Минералы матрикса эклогитов представлены омфацитом, амфиболом и цоизитом. В гранате присутствуют включения сфена, карбоната, цоизита и эпидота. Минеральная ассоциация включений свидетельствует, что в качестве протолита эклогитов выступали metabазиты эпидот-амфиболитовой фации. Расчетные температуры равновесия 600-650°C. Как было сказано выше, порфиробластовые эклогиты Сулу-Тюбе имеют изотопно-геохимические характеристики, близкие к N-MORB (Шацкий и др., 2018). Помимо порфиробластовых эклогитов в юго-западной части участка Сулу-Тюбе встречаются отдельные тела среднезернистых эклогитов аналогичных по структурно-текстурным особенностям эклогитам других участков Кокчетавского массива. В этой связи следует отметить, что значительный разброс в P-T параметрах эклогитов из одноименных комплексов, а также результаты численного моделирования процессов эксгумации высокобарических метаморфических пород свидетельствуют о том, что в субдукционном канале может происходить совмещение пород, демонстрирующих разные PT-тренды (Gerya et al., 2002; Li, Gerya, 2009; Burov, et al., 2014). Эклогиты с геохимическими особенностями континентальных и океанических базальтов зафиксированы в зоне меланжа в орогене Хонган, являющегося результатом коллизии Северо-Китайского и Южно-Китайского блоков (Wu, Zheng, 2013; Cheng, Vervoort, 2015). Показано, что эклогиты океанического и континентального типов подверглись одному и тому же эпизоду метаморфизма эклогитовой фации в перми.

Порфиробластовый эклогит Ст-87-58 сложен гранатом, омфацитом, амфиболом, фенгитом, эпидотом, кварцем. В гранате включения эпидота и амфибола. Гранат демонстрирует сильную зональность, выраженную в увеличении содержания магния от 3.4 до 10% и уменьшении содержания железа от 26 до 19.6%. Содержание CaO уменьшается от 10.6 до 8%. Краевые части граната с пироксеном показывают температуру равновесия 720°C (Ellis, Green, 1979), в то же время центральные части граната показывают температуру 600°C. У эклогита Ст-82-29 порфиробласты граната достигают в размере 1 см. Эклогит сложен гранатом, омфацитом, амфиболом, цоизитом, эпидотом, кварцем. В гранате в большом количестве встречаются включения амфиболов (ферропаргасит, эденит, тарамит, магниотарамит), эпидота. Кроме того, в периферической части появляются включения омфацита. Как и в эклогите Ст-87-58, гранат демонстрирует сильную химическую зональность. Содержание магния от центра к краю меняется от 3.9 до 10%, железа от 26.4 до 21%, кальция от 10 до 8%. Температуры равновесия граната с включением пироксена составляют 650°C. Края граната и пироксена матрикса показывают температуру равновесия матрикса 720°C. Среднезернистый эклогит Ст-84-3 сложен гранатом, пироксеном, кварцем, амфиболом. Амфибол замещает омфацит и образует порфиробласты с включениями гранатов. Эклогиты этого структурного типа широко представлены на участке Кулет. У граната

наблюдается слабая прогрессивная зональность, выраженная в увеличении от центра к краю Mg и Fe и уменьшении Ca. При это железистость меняется незначительно (от 80 до 77%). В гранате в большом количестве присутствуют включения рутила и омфациита. Температуры равновесия 600-650°C. Среднезернистый эклогит Ст-87-66 сложен гранатом, омфациитом, кварцем и амфиболом. Амфибол развивается по омфацииту. В гранате присутствуют включения омфациита. Гранаты практически не зональны. температуры равновесия лежат в интервале 680-740°C. Таким образом разные структурные типы эклогитов демонстрируют близкие температуры пика метаморфизма (700-740°C). Разброс температур может объясняться неопределённостью в расчете трехвалентного железа. Только среднезернистый эклогит Ст-84-3 имеет температуру равновесия 650°C. В то же время включения в гранатах порфиробластовых эклогитов свидетельствуют о том, что в качестве их протолитов выступали гидратированные базиты которые были метаморфизованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации. В среднезернистых эклогитах в гранатах отсутствуют включения водосодержащих минералов, что дает основания предполагать, что они были гидратированы в зоне субдукции.

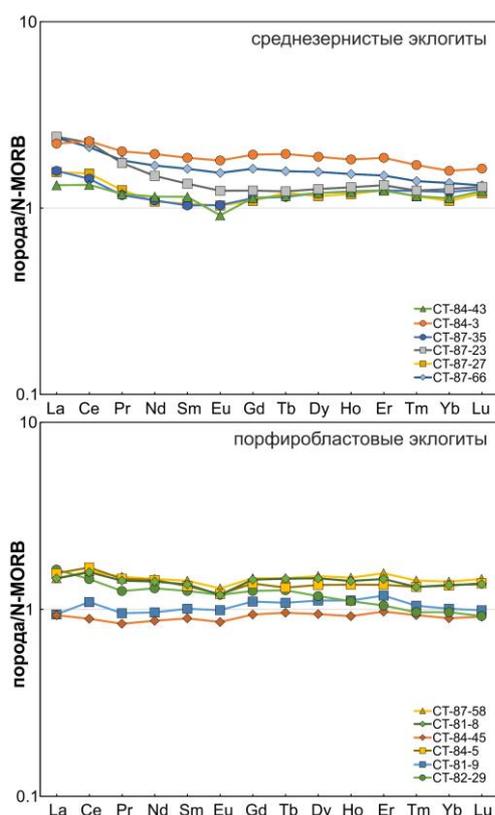


Рисунок 4. Редкоземельные спектры эклогитов участка Сулу-Тюбе, нормированные к составу базальта N-MORB/

Все эклогиты по составу отвечают базальтам. Содержание SiO₂ у них варьирует от 46.1 до 49.4%. Все порфиробластовые эклогиты, за исключением Ст-84-5, имеют, (La/Sm)_Nотношения меньше 1 (0.6-0.9), близкое к базальтам N-MORB (Arevalo, McDonough, 2010) (Рис. 4). В то же время у всех среднезернистых и мелкозернистых эклогитов, за

исключением образца Ст-87-66, это отношение больше 1 или равно 1 (1-1.38). Порфиробластовые эклогиты имеют характер распределения РЗЭ, близкий к N-MORB. Некоторые из них обогащены лантаном, что может быть связано с подвижностью лантана в процессе эксгумации эклогитов. Коэффициент корреляции лантана с иттербием для порфиробластовых эклогитов 0.48. Коэффициент корреляции неодима с самарием 0.99. Некоторые эклогиты имеют слабую отрицательную европиевую аномалию (Eu^* 0.8-0.85). Среднезернистые эклогиты на диаграмме, нормированной на N-MORB, показывают отрицательный наклон от европия к лантану.

Шесть образцов разных структурных типов эклогитов были отобраны для анализа изотопного состава стронция и неодима. Изотопный состав неодима порфиробластовых эклогитов, с учетом новых и ранее полученных данных (Шацкий и др., 2018) варьирует от 0.513009 до 0.513103 при отношении Sm/Nd от 0.311 до 0.347. Среднее значение $^{143}Nd/^{144}Nd$ всех базальтов MORB, согласно Gale et al. (2013), составляет 0.513074, отношение Sm/Nd - 0.325. Изотопные отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ составляют 0.702819. Таким образом порфиробластовые эклогиты имеют изотопный состав неодима близкий к базальтам MORB. В то же время изотопный состав неодима среднезернистых эклогитов значительно отличается от состава порфиробластовых эклогитов (0.512265-0.512908). Проведенные нами исследования показали, что только порфиробластовые эклогиты участка Сулу-Тюбе по изотопно-геохимическим характеристикам отвечают базальтам N-MORB. Результаты минералого-петрографических исследований показывают, что только у порфиробластовых эклогитов в качестве протолитов выступали гидратированные базиты, метаморфизованные ранее в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Эклогиты других участков, а также среднезернистые эклогиты участка Сулу-Тюбе, были гидратированы в зоне субдукции, вероятно, в процессе эксгумации. Таким образом мы вправе предположить разную тектоническую позицию протолитов эклогитов. В качестве протолитов порфиробластовых эклогитов Сулу-Тюбе могут рассматриваться гидратированные породы океанической коры, в то время как протолитами среднезернистых эклогитов могли быть базиты континентальной окраины. Одинаковые условия пика метаморфизма среднезернистых и порфиробластовых эклогитов участка Сулу-Тюбе свидетельствуют о том, что породы океанической и континентальной коры были совмещены в зоне субдукции. В процессе коллизии часть континентальной окраины, в настоящее время представленная алмазоносными породами западного блока, была субдуцирована на глубины, отвечающие верхней мантии, в то же время эклогиты и вмещающие породы восточного блока достигали глубин, отвечающих полю устойчивости коэсита и были эксгумированы при продолжающейся субдукции континентальной окраины.

С учетом полученных данных, в частности близости геохимических характеристик порфиробластовых эклогитов участка Сулу-Тюбе к базальтам N-MORB, нами проведены более детальные минералого-геохимические исследования эклогитов разных структурных типов данного участка. Было отобрано пять образцов порфиробластовых эклогитов, слагающих крупное тело (1.5 км x 0.5 км x 0.5 км) среди слюдяных сланцев и гнейсов, и 6 среднезернистых эклогитов, образующих отдельные тела в юго-западной сопки Сулу-Тюбе. Для первой группы пород расчетные температуры равновесия составили 600-650⁰С.

1.2. Петрология и изотопная геохимия эклогитов субдукционно-коллизионных зоны комплекса Алаг-Хадны (ЮЗ Монголия).

Проведено первое систематическое геохимическое исследования эклогитов из комплекса Алаг-Хадны юго-западной Монголии. Изученные эклогиты демонстрируют относительно узкий диапазон содержания SiO₂ (для большинства образцов в пределах 48.0-51.3%) и щелочей (для большинства образцов в пределах 2.08-2.84% суммы K₂O и Na₂O) при низком K₂O (0.14-0.67%, только для двух образцов содержание K₂O выше 1%) и умеренном содержании TiO₂ (1.11-2.45%), что соответствует примитивным низкокалийевым толеитам. Разброс в значениях отношения K₂O/Na₂O и содержания K₂O в некоторых образцах может указывать на различную степень выноса щелочей в процессе прогрессивного метаморфизма. Все эклогиты характеризуются относительно низким содержанием MgO и высоким FeO, что выражено в магнезиальности (Mg# 37-56) и подтверждает толеитовую природу протолита пород. У эклогитов наблюдается корреляция ниобия с РЗЭ и торием. В то же время с крупноионными литофильными элементами (Cs, Rb, Ba, K, Sr) корреляция отсутствует. Это свидетельствует о том, что подвижными в ходе метаморфизма были только крупноионные литофильные элементы. Кривые распределения редкоземельных элементов, нормированные на углистый хондрит CI (Sun and McDonough, 1989), демонстрируют слабый отрицательный наклон от тяжелых к легким РЗЭ (рис. 5). Отношения La/Yb_N и Gd/Yb_N находятся в диапазоне 1.04-1.78 и 1.11-1.60, соответственно. У спектров распределения РЗЭ четырех эклогитов наблюдается слабая отрицательная Еуаномалия. Один эклогит (ЦУ-15-67) с наибольшей величиной отношения La/Yb_N 1.78 имеет также наибольшее общее содержания РЗЭ (120 ppm) и других редких элементов. Мультиэлементные диаграммы для эклогитов, нормированные на состав примитивной мантии (McDonough and Sun, 1995) (рис. 5) также имеют плоский характер или слабый отрицательный наклон и характеризуются обогащением Th, легкими РЗЭ, Nb и Ta относительно N-MORB и в целом близки по характеру распределения к E-MORB, однако отличаются пониженными содержаниями ниобия и тантала и более пологим наклоном кривых. Содержание крупноионных литофильных

элементов (Cs, Rb, Ba, K, Sr) и Pb (все на графике не показаны) имеет значительные вариации, вероятно обусловленные мобильностью указанных элементов при дегидратации на прогрессивной стадии метаморфизма.

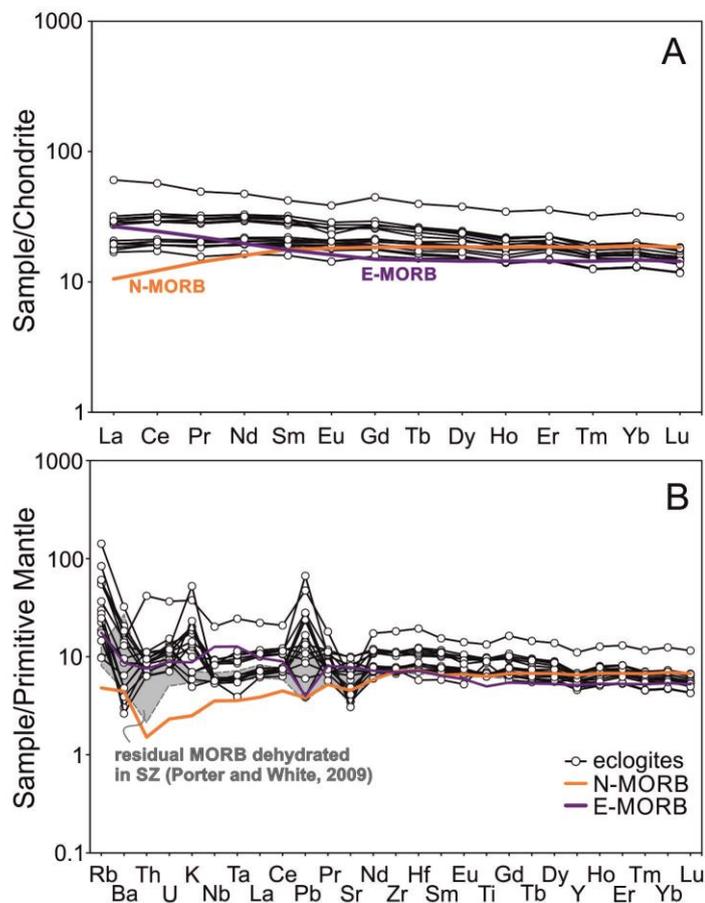


Рисунок 5. Геохимические редкоземельные (А) и мультикомпонентные (В) характеристики эклогитов комплекса Алаг-Хадны (юго-западная Монголия).

Стоит, однако, отметить, что для большинства эклогитов характерен схожий характер распределения наиболее несовместимых крупноионных литофилов (Cs, Rb, Ba) и U-Th при их содержании близком к E-типу. У всех эклогитов, за исключением одного образца, наблюдается положительная свинцовая аномалия, свидетельствующая о коровой контаминации. На дискриминантных диаграммах с использованием наименее подвижных элементов (HFSE, Y, Th) точки состава эклогитов попадают в поля базальтов островных дуг и океанического дна. Как было замечено выше, что на дискриминантных диаграммах наблюдается значительное перекрытие полей базальтов из разных геодинамических обстановок. Близость к океаническим базальтам выражается в низких отношениях Th/Yb (0.25-0.29), существенно повышенном только для эклогита ЦУ-15-67 (0.60), Nb/Yb (1.24-2.44) (заметно выше значения для N-MORB, но ниже значений для E-MORB и континентальной коры), тогда как по отношениям Lu/Hf (0.12-0.18) и Sm/Nd (0.29-0.33) эклогиты наиболее схожи с островодужными базальтами. В то же время по характеру

распределения несовместимых они значительно отличаются от островодужных базальтов, в частности по отсутствию отрицательных аномалий по танталу и ниобию. Индикаторные элементные отношения Th/Nb (0.13-0.25), La/Nb (1.08-1.32), Ce/Nb (2.62-3.53) имеют более высокие значения в сравнении с типичными E-MORB (0.07, 0.76 и 1.81, соответственно) и отражают умеренный до высокого вклад вероятно немантийного источника Th и легких РЗЭ. Таким образом, на основании полученных данных в качестве протолита эклогитов наиболее вероятны породы толеитовой серии, в различной степени дифференцированные (в частности, по содержанию Fe и Ti) и контаминированные материалом континентальной коры.

Шесть эклогитов, а также один образец ортогнейса, по одному – метапелита, вмещающего эклогиты гнейса и кварц-цоизит-мусковит-амфиболовой жилы, были проанализированы на валовый изотопный состав Nd и Sr. Эклогиты демонстрируют относительно узкий диапазон отношений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(T)$ (рис. 6), пересчитанных на предполагаемый возраст высокobarического метаморфизма 550 млн. лет (0.512046-0.512117), за исключением одного образца, для которого ранее выявлено наиболее высокое соотношение легких и тяжелых РЗЭ (ЦУ-15-67, 0.511849).

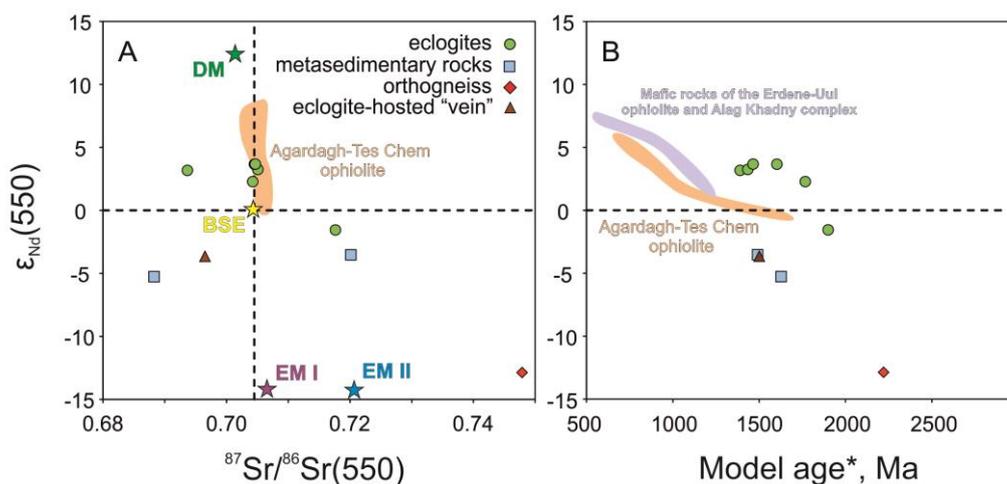


Рисунок 6. Изотопные Sr-Nd характеристики эклогитов комплекса Алаг-Хадны (юго-западная Монголия).

Соответствующие значения $\epsilon\text{Nd}(T)$ и модельного возраста (T_{DM}) находятся в узком диапазоне $+2.3 \div +3.7$ и 1.39-1.77 млрд. лет, соответственно и указывают на практически однородный, обогащенный относительно деплетированной мантии источник, тогда как для эклогита ЦУ-15-67 характерны отрицательная величина $\epsilon\text{Nd}(T)$ -1.6 и модельный возраст T_{DM} 1.9 млрд. лет, указывающие на существенный вклад корового источника. Обогащенная природа мантийного источника подтверждается также отношением $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ эклогитов (0.1698-0.1935), которое систематически ниже хондритового.

Первичные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(T)$ варьируют в пределах 0.6883-0.7176 вероятно ввиду различной степени мобилизации или привноса флюидомобильных Rb и Sr, что

согласуется с значительными вариациями отношения $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (0.13-9.42). Фельзитический ортогнейс *ЦУ-15-56* характеризуется отрицательной величиной $\epsilon\text{Nd}_{(T)}$ -12.9 и двухстадийным модельным возрастом 2.2 млрд. лет (Liewand, Hoffman, 1988), что указывает на палеопротерозойский протолит пород и согласуется с радиогенным составом Sr с отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(T)$ 0.7479. Образцы метапелита *ЦУ-15-26*, гнейса *ЦУ-15-53* и жилы в эклогитах *ЦУ-15-43* имеют умеренно отрицательные значения $\epsilon\text{Nd}_{(T)}$ (-3.7 ÷ -5.3) и двухстадийные возраста 1.50-1.63 млрд. лет, схожие с таковыми для эклогитов. Рассчитанные величины отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(T)$ варьируют в пределах 0.6882-0.7201 при отношении $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 3.59-9.42.

Изотопный состав кислорода гранатов и омфацитов из 9 эклогитов довольно разнороден и лежит в диапазоне +5.5÷+9.0‰, от величин, характерных для типичных мантийных гранатов (*ЦУ-15-16*, *ЦУ-15-37*) (Wang et al., 2011) до заметно повышенных значений. Фракционирование $\delta^{18}\text{O}$ в паре гранат-пироксен ($\Delta^{18}\text{O}_{\text{Grt-Px}}$) также варьирует от величин, находящихся в пределах ошибки измерения (-0.2), до значительных (-1.1). Тем не менее, только для двух образцов (*ЦУ-15-3/4*, *ЦУ-15-42*) значения $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Grt-Px}}$ соответствуют петрологически значимым температурам равновесного фракционирования (615-650°C по методике расчета (Zheng et al., 1993), которые близки ранее полученным результатам термодинамического моделирования РТ-эволюции эклогитов (Stipska et al., 2010). Для остальных образцов низкие значения $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Grt-Px}}$ и соответствующие высокие (>850°C) значения температуры равновесия вероятно обусловлены изотопным обменом между омфацитом и ретроградным флюидом с низким $\delta^{18}\text{O}$ в процессе эксзумации (к примеру, Xie et al., 2004). Единственное заметно повышенное значение $\delta^{18}\text{O}$ для граната (9‰) наблюдается в образце *ЦУ-15-67*, для которого выше приведены отличные от остальных характеристики Sr-Nd-изотопного состава.

Ранее для эклогитов комплекса Алаг-Хадны предположен океанический протолит типа T-MORB (Stipska et al., 2010). Значения $\epsilon\text{Nd}_{(T)}$, полученные нами, в отличие от единичного определения ранее (+7.1; Burianek et al., 2017), свидетельствуют против типичной океанической природы протолита, что подтверждается изотопным составом кислорода ($\delta^{18}\text{O}$ гранатов преимущественно в пределах +5.5÷6.6) это близко к мантийному значению и высоким $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ (0.15-0.21) (рис. 7), отличным от значений MORB (0.07-0.16) (Christie et al., 1986; Cottrell and Kelley, 2011; Kelley and Cottrell, 2009; Bezos and Humler, 2005) и схожим с базальтами более окисленных, задуговых (0.15-0.18) и надсудбукционных источников (0.19-0.32) (Kelley and Cottrell, 2009).

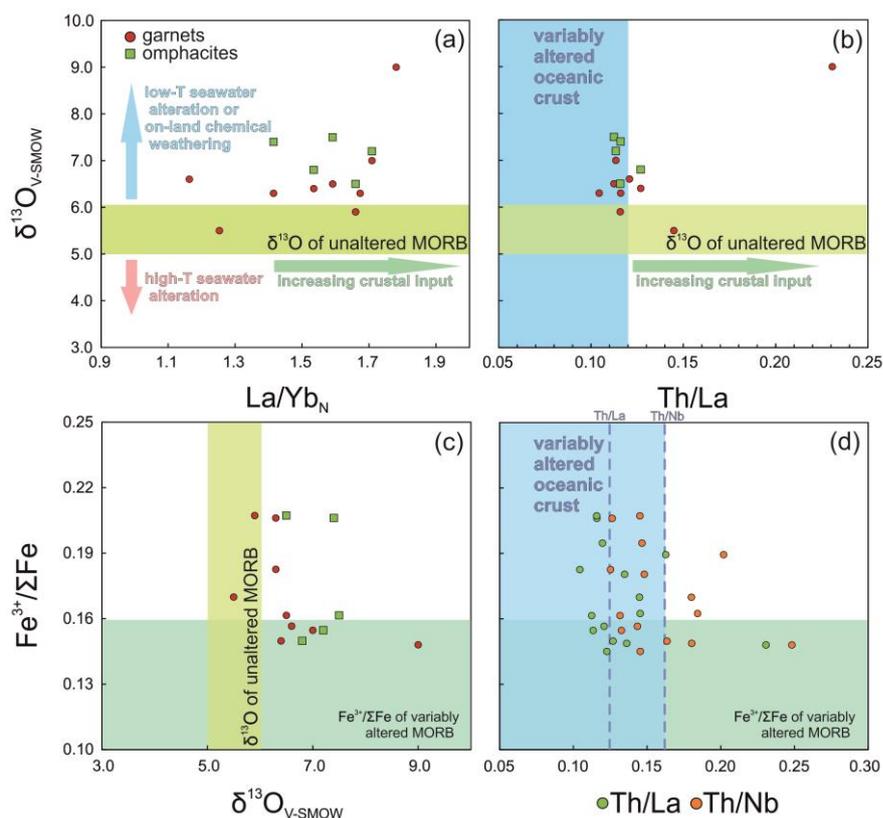


Рисунок 7. Геохимические вариации состава и изотопного состава кислорода гранатов эклогитов комплекса Алаг-Хадны (юго-западная Монголия).

Ассимиляция океанических пород и осадков с высоким $\delta^{18}\text{O}$ в процессе рифтогенеза ведет к серьезному изменению валового $\delta^{18}\text{O}$ в расплаве (к примеру, King and Valley, 2001; Bindeman, 2008; Borisova et al., 2016), при этом эффект ассимилированной океанической коры на валовое $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ незначителен (Lécuyer and Ricard, 1999), но может быть больше в случае ассимиляции осадков (Chester et al., 1990). Кроме того, повышенное $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ может быть результатом воздействия окисленных надсубдукционных флюидов (к примеру, Debret et al., 2014; Debret and Sverjensky, 2017), что обычно приводит к изменению степени окисления Fe через модификацию омфациита (Li et al., 2016) и согласуется с преимущественно неравновесным фракционированием $\delta^{18}\text{O}$ между гранатом и пироксеном.

Метаосадки, ассоциирующие с эклогитами, и метапелиты формации Майхан-Цахир, имеют схожий мезопротерозойский модельный возраст и указывают на смешение двух источников Nd с раннедокембрийским возрастом и вероятно неопротерозойского ювенильного магматизма. Распространенность континентальных высококалийевых пелитов (Stipska et al., 2010; Javkhlan et al., 2013) совместно с кварцитами и углеродсодержащими сланцами (Stipska et al., 2010) с такими изотопными характеристиками может быть результатом смешения континентальных и океанических осадков на пассивной окраине докембрийского континентального блока. Схожие мезопротерозойские модельные характеристики выявлены для турбидитов комплекса Дзаг, ассоциирующих с Байдрикским

блоком (Buchan et al., 2001; Jahn et al., 2004). В случае изученных нами метаосадочных пород, ювенильный источник может быть представлен неопротерозойским надсубдукционным магматизмом (Burianek et al., 2017) или магматизмом другой природы с преимущественно деплетированными характеристиками, тогда как единственный возможный источник с раннедокембрийскими модельными характеристиками представлен переработанной корой гнейсов комплекса Алаг-Хадны.

С учетом ограниченного свидетельства контаминации континентальной корой, систематически повышенного $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ относительно типичных MORB и ограниченным взаимодействием протолита эклогитов с океанической водой, мы предполагаем, что низкокалийевые толеитовые базальты, близкие по составу к T-MORB, могли формироваться в условиях рифтогенеза континентальной окраины. Существующие модели включают в себя (1) рифтогенез активной окраины как результат субдукции и задугового растяжения (к примеру, Dilek, 2003; Kumaretal., 2010), и (2) рифтогенез пассивной окраины на начальных стадиях открытия океанических бассейнов (к примеру, Fodor and Vetter, 1984; Andreasson and Albrecht, 1995), тогда как с характером ассоциирующих фельзических и метаосадочных пород лучше согласуется последний. Рифтогенез окраин с малым объемом магматизма как правило ассоциирует с распадом крупных континентальных структур и последующим формированием океанической коры (Quirketal., 2014; Clercetal., 2017 и ссылки в данной работе). Таким образом, формирование протолита эклогитсодержащего комплекса и наблюдаемых деформаций и хрупких деформаций в комплексах континентальной коры может быть результатом раннеопротерозойскогорифтогенеза, связанного с распадом Родинии (Li et al., 2008) и обособлением Дзабхан-Байдринского блока с рядом других более мелких континентальных блоков (Zhou et al., 2017).

Раздел 2. Исследование Sr-Nd-O-Pb изотопной систематики внутриплитовых вулканитов южного складчатого обрамления Сибирского кратона для реконструкции источников вещества мантийных расплавов, связанных с деятельностью Пра-Африканского суперплюма.

Данные по внутриплитовому магматизму Сибири, суммированные в обзоре (Кузьмин, Ярмолюк, Кравчинский, 2011), позволяют утверждать, что после распада Родинии Сибирский континент начал движение по рифейскому (Палео-Азиатскому) океану. Это перемещение привело к тому, что в определенное время континент попал под влияние Пра-Африканского суперплюма, являвшегося антиподальным Родинийскому, и именно эндогенная активность первого оказывала влияние на Сибирский палеоконтинент в течение почти всего фанерозойского времени. Причем активность в разное время проявляли

различные плюмы, находившиеся в пределах Африканского горячего поля мантии (Кузьмин, Ярмолюк, Кравчинский, 2011). Наиболее масштабным магматическим событием, связанным с активностью Пра-Африканского плюма в пределах Сибирского кратона и его складчатого обрамления, является синхронное формирование Сибирских траппов и Западно-Сибирской рифтовой системы на рубеже перми и триаса. Завершающий этап внутриплитовой активности в пределах Центрально-Азиатского орогенного пояса (ЦАОП), связанный с деятельностью Пра-Африканского плюма, связан с формированием крупных ареалов раннемеловых внутриплитовых образований (Кузьмин, Ярмолюк, Кравчинский, 2011).

2.1. Изотопная Pb-Sr изотопная систематика внутриплитных пермо-триасовых вулканитов Западно-Сибирской рифтовой системы Сибирской трапповой провинции.

Согласно оценкам (Кирдяшкин, Кирдяшкин, Дистанов, Гладков, 2016) Сибирская трапповая провинция и Западно-Сибирская рифтовая система имеют одинаковую суммарную тепловую мощность на подошвах плюмов. Объёмы синхронно излившихся магм для этих двух крупных магматических провинций также соизмеримы. Синхронность проявления, пространственная близость и сопоставимая энергетика могут служить указанием на сходство природы этих термохимических плюмов. Исследования изотопного состава базальтоидов, продуцированных ими, могут представить дополнительную информацию об их природе.

Вариации изотопного состава Pb и Sr во внутриплитных пермо-триасовых вулканитах Западной и Восточной Сибири представлены на Рисунке 8 А и Б. Диаграмма зависимости изотопного состава свинцов в координатах $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Рис. 8 А) свидетельствует о том, что точки составов пермо-триасовых вулканитов Западной Сибири группируются вдоль линии NHRL, будучи сдвинуты в область более радиогенных составов свинца по сравнению с базальтоидами N-MORB Тихого, Атлантического и Индийского океанов, траппами Восточной Сибири, а также базальтами Исландии (Mertz et al., 1991). По существу намечается линия смещения между продуктами плавления истощенного источника DM и PREMA с мантийным источником с высоким отношением U/Pb – HIMU, причем доля компонента HIMU наиболее высока именно в базальтоидах Западно-Сибирской рифтовой системы. Таким образом, проявленные синхронно в пределах крупной магматической провинции базальтоиды Восточной и Западной Сибири существенно различаются по соотношению DM/HIMU в их источнике. Следует отметить, что участие мантийного источника HIMU в генезисе базальтоидов, связанных с крупнейшим эпизодом пермотриасового внутриплитового магматизма выявлено нами впервые. По вариациям

изотопного состава свинца намечается и сдвиг многих составов пород от линии NHRL к источнику EM II.

Особенно наглядно это видно на диаграмме соотношений изотопного состава Sr и Pb (Рис. 8 Б), на которой изотопный состав стронция в базальтоидах как Восточносибирских траппов, так и Западно-Сибирской рифтовой системы более радиогенный по сравнению с источниками MORB и PREMA, причем для некоторых составов контаминация коровым веществом весьма существенна. Однако, следует подчеркнуть, что сдвиг изотопных составов Sr в сторону обогащения коровым компонентом, в некоторой степени может быть обусловлен влиянием на породы вторичных гидротермальных изменений, существование которых повсеместно фиксируется петрографическими наблюдениями.

Таким образом, анализ оригинальных и накопленных литературных данных по изотопному составу Sr и Pb в пермо-триасовых продуктах магматической деятельности Исландского плюма, ответственного за формирование магматических комплексов Восточно-Сибирских траппов и Западно-Сибирской рифтовой зоны, позволяет сделать вывод о существенной гетерогенности системы источников вещества внутриплитовых базальтоидов, включая в себя DM, HIMU, EM II и коровый компонент в разных пропорциях.

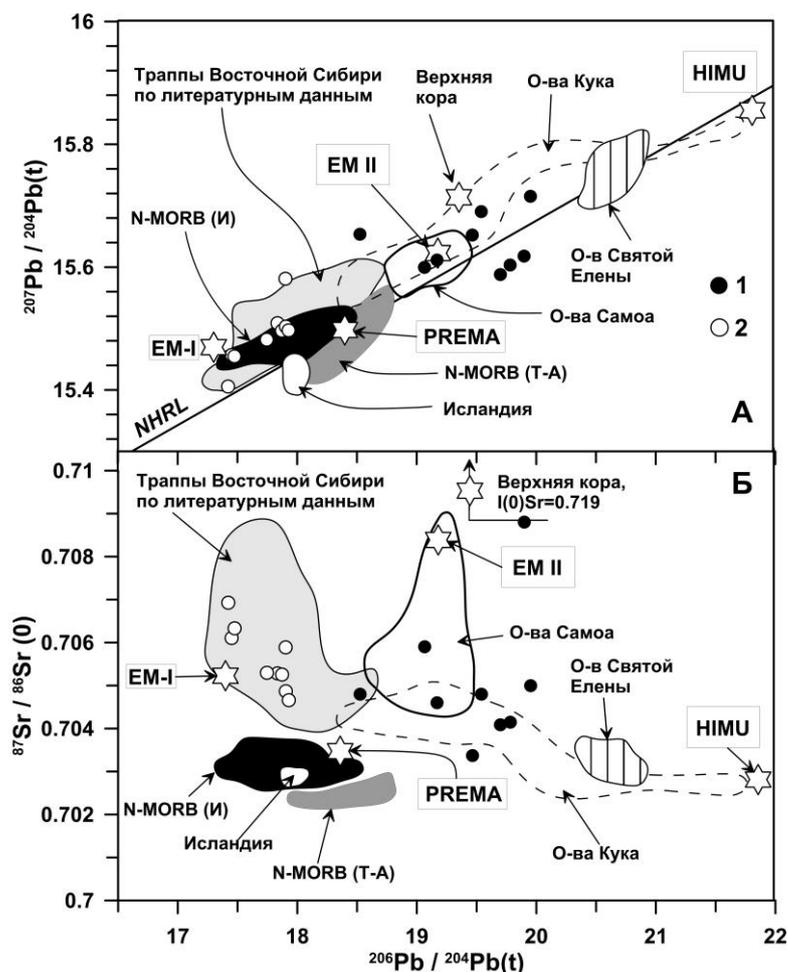


Рисунок 8. Диаграммы зависимости изотопного состава: А — свинца ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$); и Б — стронция и свинца ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$). Условные обозначения -- фигуративные точки составов пермо-триасовых вулканитов Западной Сибири (1) и Восточной Сибири (2); N-MORB (И) — поле составов базальтов MORB Индийского океана по литературным данным; N-MORB (Т-А) — поле составов базальтов MORB Тихого и Атлантического океанов по литературным данным; поле составов базальтов Исландии по (Mertz et al., 1991).

2.2. Изотопные Sr-Nd характеристики позднемезозойской трахибазальтовой серии Центрально-Азиатского орогенного пояса на примере Нилгинской депрессии (Монголия)

По геологическим, минералогическим, изотопно-геохимическим данным породы трахибазальт-трахит-трахириолитовой (ТТР) серии Нилгинской депрессии в Центральной Монголии образовались в результате близких по времени извержений дифференцированных по составу магм около 120 млн. лет назад. Исходные для них базитовые расплавы формировались в результате воздействия плюма на мантийные породы, метасоматизированные и гидратированные в ходе предшествующих субдукционных процессов. Предполагается, что в интервале от позднего палеозоя до конца мезозоя в центрах вулканической активности Северной и Центральной Азии происходило смещение очагов магмогенерации базитовых расплавов от менее глубинного и более гидратированного к более глубинному и менее гидратированному источнику подлитосферной мантии (от шпинелевого к гранатовому перидотиту).

Точки составов трахиандезибазальтов Нилгинской депрессии на диаграмме $e\text{Nd}(T)$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(0)$ (Рис. 9) образуют компактную группу в поле внутриплитных позднепалеозойско-мезозойских базальтоидов Центрально-Азиатского складчатого пояса (Ярмолюк и др., 2003), а также трахибазальтов рифтогенных впадин Восточного и Западного Забайкалья (Сасим, Дриль, 2013; Воронцов, Ярмолюк, 2007), характеризуюсь слабо отрицательной величиной $e\text{Nd}(T)$ от -0.1 до -1.54 при умеренно радиогенном первичном изотопном составе стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(0) = 0.70526 – 0.70567$. Это позволяет предполагать формирование базитовых расплавов, исходных для раннемеловых трахиандезибазальтов Нилгинской депрессии, также как и других рифтогенных базальтоидов позднепалеозойского-мезозойского возраста Центрально-Азиатского складчатого пояса (Ярмолюк и др., 2000), за счет частичного плавления мантийных пород, в образовании которых принимали участие расплавы из умеренно истощенного источника PREMA и обогащенного источника EM-II. При этом была возможна ассимиляция мантийными базитовыми расплавами некоторого количества вещества континентальной коры. Точки составов трахитов, трахидацитов, трахириодацитов и трахириолитов на диаграмме образуют горизонтальный тренд, сохраняя слабо

отрицательную величину $\epsilon Nd(T)$, аналогичную трахиандезибаазальтам (Рис. 9). При этом широко варьирует величина первичного изотопного отношения стронция $^{87}Sr/^{86}Sr_{(0)}$: 0.70665 – 0.70678 в трахитах и трахидацитах, 0.70769 – 0.70826 в трахириодацитах и 0.70826 – 0,70934 в трахириолитах. Подобный тренд вариаций изотопных составов Nd и Sr в вулканитах ТТР серии невозможно объяснить только процессами коровой контаминации, что требует рассмотрения других петрогенетических моделей.

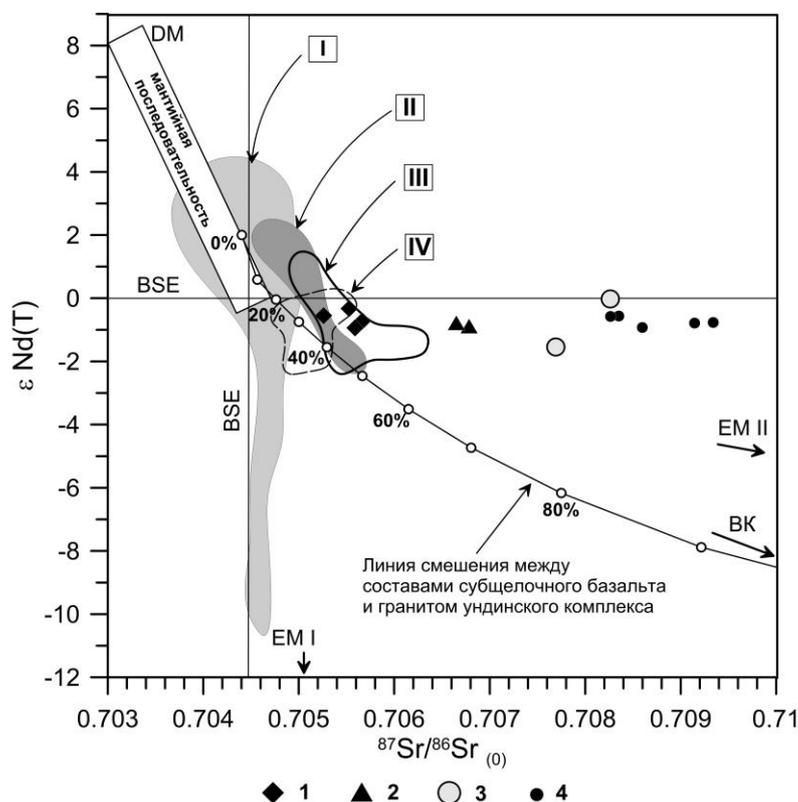


Рисунок 9. Изотопная диаграмма $\epsilon Nd(T) - ^{87}Sr/^{86}Sr_{(0)}$ для пород ТТР серии.

Условные обозначения: 1–трахиандезибаазальты; 2–трахиты; 3–трахириодацитах; 4–трахириолиты. Области составов пород: I–кайнозойских внутриплитных базальтоидов Центрально-Азиатского складчатого пояса, по (Ярмолюк и др., 2003); II–позднепалеозойских-мезозойских внутриплитных базальтоидов Центрально-Азиатского складчатого пояса, по (Ярмолюк и др., 2003); III–трахибазальтов меловых рифтогенных впадин Восточного Забайкалья, по (Сасим, Дриль, 2013); IV–трахибазальтов позднемезозойских рифтогенных впадин Западного Забайкалья, по (Воронцов, Ярмолюк, 2007). Линия смешения рассчитана между модельным составом континентального базальта Северной Азии, по (Ярмолюк и др., 2003) и гранитом ундинского комплекса, по (Козлов и др., 2003).

Влияние процессов коровой контаминации на составы базальтоидных и дифференцированных расплавов может быть приблизительно оценено с помощью диаграммы $^{87}Sr/^{86}Sr_{(0)} - 1/Sr * 1000$ (Рис. 10), на которой показаны точки состава пород ТТР серии Нилгинской депрессии, поле трахибазальтов рифтогенных впадин Восточного Забайкалья (Сасим, Дриль, 2016) и меловых (135-90 млн. лет) базальтоидов Тугнуйско-Хилокского сектора Западно-Забайкальской рифтовой области (Воронцов, Ярмолюк, 2007), а

также линии смешения между средними составами континентального базальта Северной Азии (Ярмолюк и др., 2003), верхней континентальной коры (Taylor, 1977; Taylor, McLennan, 1995) и палингенового коллизионного гранита ундинского комплекса Восточного Забайкалья, по (Козлов и др., 2003). Позднемезозойские базальтоиды рифтогенных впадин региона образуют на диаграмме вытянутый субгоризонтальный эволюционный тренд за счет вариаций концентраций стронция в породах, что может быть связано с локальными особенностями процессов фракционирования базитовых расплавов, извергавшихся на обширной территории в пределах Монголии и Забайкалья. Вариации значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(0)}$ лежат в пределах 0.7049-0.7058, что допускает ассимиляцию базитовыми расплавами 10-15 мас.% вещества континентальной коры.

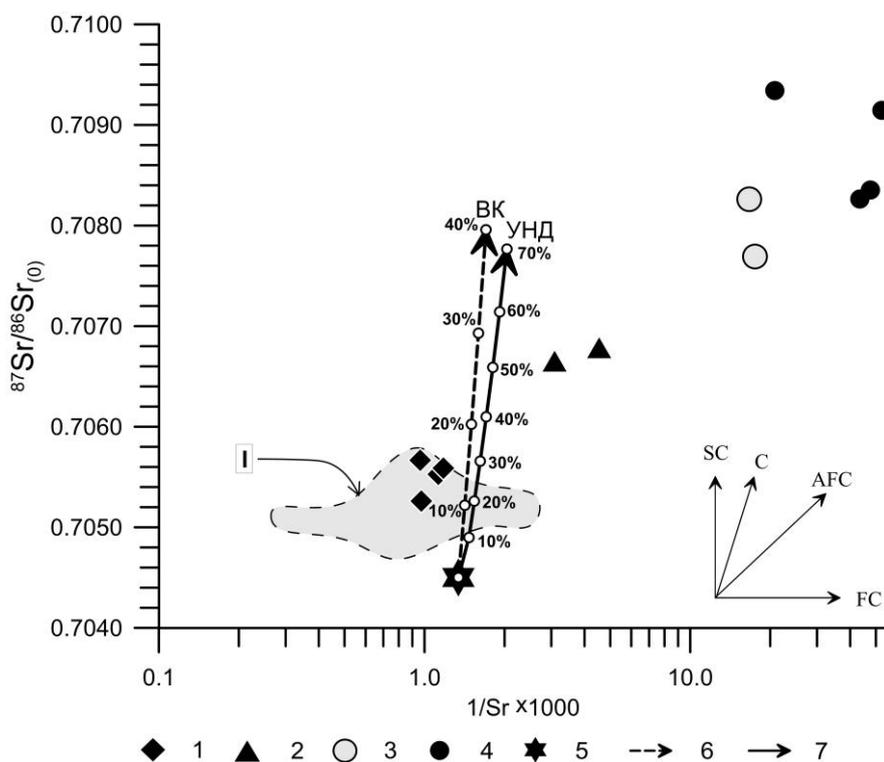


Рисунок 10. Диаграмма $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(0)} - 1/\text{Sr} \times 1000$ для пород ТТР серии. Условные обозначения: 1–трахиандезибазальты; 2–трахиты; 3–трахириодациты; 4–трахириолиты; 5-средний состав континентального базальта Северной Азии, по (Ярмолюк и др., 2003); 6 – линия смешения между модельным составом базальтового расплава и валовым составом верхней континентальной коры (UC), по (Taylor, 1977; Taylor, McLennan, 1995); 7 – линия смешения между модельным составом базальта и гранитом ундинского комплекса (УНД), по (Козлов и др., 2003). I– область составов трахибазальтов меловых рифтогенных впадин Восточного и Западного Забайкалья, по (Сасим, Дриль, 2013; Сасим, Дриль, 2016; Воронцов, Ярмолюк, 2007). Обозначение векторов процессов: FC – фракционная кристаллизация, AFC – коровая контаминация и фракционная кристаллизация, C – смешение источников при коровой контаминации, SC – изменения состава при смене мантийных источников.

Изотопный состав кислорода определен в нескольких породах ТТР серии. Наименьшее количество тяжелого изотопа кислорода имеют трахиандезибазальты ($\delta^{18}\text{O}$ 7.5 и 8.5 ‰). В трахитах, трахириодацитах и трахириолитах величина $\delta^{18}\text{O}$ повышается

относительно трахиандезибазальтов, но изменяется незначительно от 9.4 до 10.9 ‰ и не зависит от содержания SiO₂ в породах.

Таким образом, для пермо-триасовых вулканитов Сибирских траппов и Западно-Сибирской рифтовой системы выявлена существенная гетерогенность системы источников вещества внутриплитовых базальтоидов. В формировании основных пород первой магматической провинции принимали участие источники MORB, PREMA и верхней коры, а для второй было обосновано дополнительное влияние источника HIMU. Формирование базитовых расплавов, исходных для раннемеловых трахиандезибазальтов Нилгинской депрессии, также как и других рифтогенных базальтоидов позднепалеозойского-мезозойского возраста Центрально-Азиатского орогенного пояса, происходило за счет частичного плавления мантийных пород, в образовании которых принимали участие расплавы из умеренно истощенного источника PREMA и обогащенного источника EM-II.

Заключение

Проведено изотопно-геохимическое исследование эклогитов из двух раннекаледонских субдукционно-коллизийных зон, представленных Кокчетавским массивом (Казахстан) и комплекса Алаг-Хадны (ЮЗ Монголия). Установлено, что эклогиты Кокчетавской субдукционно-коллизийной зоны из доменов высокого (участки Кулет, Чаглинка, Сулу-Тюбе, Даулет, Боровое) и ультравысокого давления (участки Кумды-Коль, Барчинский) демонстрируют значительные вариации в содержаниях ряда несовместимых элементов, а также изотопных соотношениях Nd ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - 0.512163-0.513180) и Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - 0.70393-0.78447). Эклогиты Сулу-Тюбе имеют изотопно-геохимические характеристики близкие к N-MORB, в то же время эклогиты других участков по этим характеристикам близки к E-MORB или базальтам островных дуг (IAB). Модельный возраст $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$ эклогитов варьирует от 1.95 до 0.67 млрд.лет. Наиболее молодой модельный возраст имеют эклогиты Сулу-Тюбе, которые так же характеризуются значениями $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ (+7.2) и соотношениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, близкими к деплетированной мантии. Вариации $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ - $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ -T эклогиты указывают на контаминацию протолитов эклогитов коровым материалом. Детальные исследования эклогитов участка Сулу-Тюбе показали, что породы различных структурных типов (порфиробластовые и среднезернистые) могли иметь контрастные (океанический, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 0.513009-0.513103, и континентальный, 0.512265-0.512908) протолиты при схожих условиях метаморфизма. Проведенные нами исследования показали, что только порфиробластовые эклогиты участка Сулу-Тюбе по изотопно-геохимическим характеристикам отвечают базальтам N-MORB и содержат водосодержащие минералы в ассоциации включений в гранате, и таким образом могут представлять собой фрагменты гидратированной базитовой океанической коры. Таким образом, в Кокчетавском массиве присутствуют эклогиты с геохимическими особенностями базальтов N-MORB и базальтов пассивных континентальных окраин. Это может объясняться либо контаминацией континентальной корой базальтов, имеющих мантийный источник, аналогичный N-MORB, либо совмещением в зоне субдукции базальтов океанической коры и континентальной окраины.

Эклогиты комплекса Алаг-Хадны, соответствующие по геохимическим особенностям базальтам типа T-MORB варьируют по изотопным характеристикам Nd и Sr. Значения $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ и модельного возраста (T_{DM}) эклогитов ЮЗ Монголии (+2.3÷+3.7, 1.39-1.77 млрд. лет) указывают на относительно однородный, обогащенный относительно деплетированной мантии источник в расчете на предполагаемый возраст субдукции, тогда как для одного эклогита характерны отрицательная величина $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ -1.6 и модельный возраст T_{DM} 1.9 млрд. лет, указывающие на существенный вклад корового источника.

Наиболее масштабным событием внутриплитной эндогенной активности в пределах Сибирского палеоконтинента в фанерозойское время было синхронное формирование Сибирских траппов и Западно-Сибирской рифтовой системы на рубеже перми и триаса. Оно было связано с деятельностью Исландского плюма, принадлежащего к Пра-Африканскому горячему полю мантии. Завершающие этапы эндогенной активности, связанной с Пра-Африканским горячим полем мантии, стали позднемезозойские рифтогенные внутриплитовые вулканические образования Центрально-Азиатского орогенного пояса.

Для пермо-триасовых вулканитов Сибирских траппов и Западно-Сибирской рифтовой системы была выявлена существенная гетерогенность системы источников вещества внутриплитовых базальтоидов. В формировании основных пород первой магматической провинции принимали участие источники MORB, PREMA и верхней коры, а для второй было обосновано дополнительное влияние источника HIMU. Формирование базитовых расплавов, исходных для раннемеловых трахиандезибазальтов Нилгинской депрессии, происходило за счет частичного плавления мантийных пород, в образовании которых принимали участие расплавы из умеренно истощенного источника PREMA и обогащенного источника EM-II.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Arevalo R., McDonough W.F. Chemical variations and regional diversity observed in MORB // *Chemical Geology*. – 2010. – 271. P.70–85.
- Andreasson P.-G., Albrecht L. Derivation of 500 Ma eclogites from the passive margin of Baltica and a note on the tectonometamorphic heterogeneity of eclogite-bearing crust // *Geol. Mag.* – 1995. – 132 (6). P.729–738.
- Bezou A., Humler E. The Fe³⁺/ΣFe ratios of MORB glasses and their implications for mantle melting // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2005. – 69. P.711–725.
- Bindeman I. Oxygen isotopes in mantle and crustal magmas as revealed by single-crystal analysis // *Rev. Miner. Geochem.* – 2008. – 69. P.445–478.
- Borisova A.Y., Gurenko A.A., Martel C., Kouzmanov K., Cathala A., Bohron W.A., Pratomio I., Sumarti S. Oxygen isotope heterogeneity of arc magma recorded in plagioclase from the 2010 Merapi eruption (Central Java, Indonesia) // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2016. – 190. P.13–34.
- Buchan C., Cunningham D., Windley B.F., Tomurhuu D. Structural and lithological characteristics of the Bayankhongor ophiolite zone, Central Mongolia // *J. Geol. Soc.* – 2001. – 158. P. 445–460.
- Burianek D., Schulmann K., Hrdličková K., Hanžl P., Janoušek V., Gerdes A., Lexa O., Geochemical and geochronological constraints on distinct Early Neoproterozoic and Cambrian accretionary events along southern margin of the Baydrag continent in western Mongolia // *Gondwana Res.* – 2017. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2016.09.008>.
- Burov E., Francois T., Yamato P., Wolf S. Mechanisms of continental subduction and exhumation of HP and UHP rocks // *Gondwana Res.* – 2014. – 25. P. 464–493.
- Cheng H., Vervoort J.D. Combined geochemistry and geochronology constrains coupled subduction of oceanic and continental crust in the Huwanshan zone, central China // *Am. Mineral.* – 2015. – 100 (1). – P.181–194.
- Chester R. *Marine Chemistry*. Uniwin Hyman, London. – 1990. – pp. 698.
- Christie D.M., Carmichael I.S.E., Langmuir C.H. Oxidation states of mid-ocean ridge basalt glasses // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1986. – 79. P. 397–411.
- Clerc C., Ringenbach J.-C., Jolivet L., Ballard J.-F. Rifted margins: ductile deformation, boudinage, continentward-dipping normal faults and the role of the weak lower crust // *Gondwana Res.* – 2017. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2017.04.030>.
- Cottrell E., Kelley K.A. The oxidation state of Fe in MORB glasses and the oxygen fugacity of the upper mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2011. – 305. P.270–282.
- Debret B., Andreani M., Muñoz M., Bolfan-Casanova N., Carlut J., Nicollet C., Schwartz S., Trcera N. Evolution of Fe redox state in serpentine during subduction // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2014. – 400. P.206–218.
- Debret B., Sverjensky D.A. Highly oxidising fluids generated during serpentinite breakdown in subduction zones // *Sci. Rep.* – 2017. – 7. P. 10351.
- Dilek Y. Ophiolite concept and its evolution. In: Dilek, Y., Newcomb, S. (Eds.), *Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought: Geological Society of America Special Paper.* – 2003. – 373. pp. 1–16.
- Ellis D.J., Green D.H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria // *Contrib Mineral Petrol.* – 1979. – 71(1). P.13–22
- Fodor R.V., Vetter S.K. Rift-zone magmatism: petrology of basaltic rocks transitional from CFB to MORB, southeastern Brazil margin // *Contrib. Miner. Petrol.* – 1984. – 88. P.307–321.
- Gerya T.V., Stockhert B., Perchuk A.L. Exhumation of high-pressure metamorphic rocks in a subduction channel: A numerical simulation // *Tectonics.* – 2002. – 21 (6). P.1056.
- Jahn B.-M., Windley B., Natal'in B., Dobretsov N. Preface – Phanerozoic continental growth in Central Asia Preface // *J. Asian Earth Sci.* – 2004. – 23. P.599–603.
- Javkhlan O., Takasu A., Fazle Kabir Md., Bat-Ulzii D. Metamorphic pressure-temperature evolution of garnet-chloritoid schists from the Lake Zone, SW Mongolia // *J. Miner. Petrol. Sci.* – 2013. – 108. P.255–266.

- Jourdan F., Bertrand H., Schärer U., Blichert-Toft J., Féraud G., Kampunzu A.B. Major and Trace Element and Sr, Nd, Hf, and Pb Isotope Compositions of the Karoo Large Igneous Province, Botswana–Zimbabwe: Lithosphere vs Mantle Plume Contribution // *J. Petrol.* - 2007. - 48 (6). P. 1043–1077.
- Jourdan F., Bertrand H., Féraud G., Le Gall B., Watkeys M.K. Lithospheric mantle evolution monitored by overlapping large igneous provinces: Case study in southern Africa // *Lithos.* - 2009. – 107. (3–4). P. 257–268.
- Kelley K.A., Cottrell E. Water and the oxidation state of subduction zone magmas // *Science.* - 2009. – 325. P. 605–607.
- King E.M., Valley J.W. The source, magmatic contamination, and alteration of the Idaho batholith // *Contrib. Miner. Petrol.* - 2001. – 142. P.72–88.
- Krogh Ravna E. The garnet–clinopyroxene Fe²⁺–Mg geothermometer: an updated calibration // *J Metamorphic Geol.* – 2000. -18. P.211-219
- Kumar K.V., Ernst W.G., Leelanandam C., Wooden J.L., Grove M.J. First Paleoproterozoic ophiolite from Gondwana: Geochronologic–geochemical documentation of ancient oceanic crust from Kandra, SE India // *Tectonophysics.* - 2010. – 487. P.22–32.
- Lécuyer C., Ricard Y. Long-term fluxes and budget of ferric iron: implication for the red-ox states of the earth's mantle and atmosphere // *Earth Planet. Sci. Lett.* - 1999. – 165. P.197–211.
- Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., Waele B.D., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlström K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thorne K., Vernikovsky V. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // *Precamb. Res.* - 2008. – 160. P.179–210.
- Li D.-Y., Xiao Y.L., Li W.-Y., Zhu X., Williams H.M., Li Y.-L. Iron isotopic systematics of UHP eclogites respond to oxidizing fluid during exhumation // *J. Metamorph. Geol.* - 2016. – 34. P.987–997.
- Liew T.C., Hofmann A.W. Precambrian crustal components, plutonic associations, plate environment of the Hercynian Fold Belt of Central Europe: indications from a Nd and Sr isotopic study // *Contrib. Mineral. Petrol.* - 1988. – 98. P.129–138.
- McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* - 1995. -120. - (3–4) P. 223–253.
- Nakamura D. A new formulation of garnet–clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analysis of a large experimental data set // *J Metamorphic Geol* – 2009. – 27. P. 495-508.
- Li Z., Gerya T.V. Polyphase formation and exhumation of HP–UHP rocks in continental subduction zone: numerical modeling and application to the Sulu UHP terrane in eastern China // *J. Geophys. Res.* - 2009. – 114. B09406.
- Mertz D.F., Devey C.W., Todt W., et al. Sr-Nd-Pb isotope evidence against plume–asthenosphere mixing north of Iceland // *Earth and Planetary Science Letters.* – 1991. – 107. P.243-255.
- Neumann E.-R., Svensen H., Galerne C.Y., Planke S. Multistage Evolution of Dolerites in the Karoo Large Igneous Province, Central South Africa // *J. Petrol.* - 2011. - 52 (5). P.959–984
- Quirk D.G., Shakerley A., Howe M.J. A mechanism for construction of volcanic rifted margins during continental breakup // *Geology.* - 2014. – 42 (12). P.1079–1082.
- Shatsky V.S., Jagoutz E., Sobolev N.V., Kozmenko O.A., Parkhomenko V.S., Troesch M. Geochemistry and age of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif (Northern Kazakhstan) // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1999. - 137 (3). P.185–205.
- Stipska P., Schulmann K., Lehmann J., Corsini M., Lexa O., Tomurhuu D. Early Cambrian eclogites in SW Mongolia: evidence that the Palaeo-Asian Ocean suture extends further than expected // *J. Metamorph. Geol.* - 2010. – 28. P.915–933.
- Taylor S.R. Island arc models and the composition of the continental crust // *Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-arc Basins.* Am. Geophys. Union, Maurice Ewing. – 1977. -Ser.1. P. 325–335.

Taylor S.R., McLennan S.M. The geochemical evolution of the continental crust // Review of Geophysics. – 1995. - v. 33(2). P. 241–265.

Wu Y.-B., Zheng Y.-F. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling–Tongbai–Hong’an–Dabie–Sulu orogenic belt in central China // Gondwana Res. - 2013. - 23 (4). P.1402–1428.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes, in: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.). - Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ. Geological Society of London. London. – 1989. pp. 313–345.

Wang Z.R., Bucholz C., Skinner B., Shimizu N., Eiler J. Oxygen isotope constraint on the origin of high-Cr garnets from kimberlites // Earth Planet. Sci. Lett. - 2011. – 312. P.337–349.

Xie Z., Zheng Y.-F., Jahn B.-M., Ballevre M., Chen J., Gautier P., Gao T., Gong B., Zhou J., Sm–Nd and Rb–Sr dating of pyroxene–garnetite from North Dabie in east-central China: problem of isotope disequilibrium due to retrograde metamorphism // Chem. Geol. - 2004. – 206 P. 137–158.

Zheng Y.-F. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals // Geochim. Cosmochim. Acta. - 1993. – 57. P.1079–1091.

Zhou J.-B., Wilde S.A., Zhao G.-C., Han J., Nature and assembly of microcontinental blocks within the Paleo-Asian Ocean. Earth Sci. Rev. - 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01>.

Воронцов А.А., Ярмолюк В.В. Эволюция вулканизма Тугнуйско-Хилокского сектора Западно-Забайкальской рифтовой области в позднем мезозое и кайнозое // Вулканология и сейсмология. – 2007. - № 4. - С. 3–28.

Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., Дистанов В.Э., Гладков И.Н. Геодинамические режимы мантийных плюмов // Геология и геофизика. - 2016. - Т.57. - №6. - С.1092-1105.

Козлов В.Д., Ефремов С.В., Дриль С.И., Сандиминова Г.П. Геохимия, изотопная геохронология и генетические черты Верхнеундинского гранитоидного батолита (Восточное Забайкалье) // Геохимия. – 2003. - № 4. С. 408–424.

Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Кравчинский В. А. Фанерозойский внутриплитовый магматизм Северной Азии: абсолютные палеогеографические реконструкции Африканской низкоскоростной мантийной провинции // Геотектоника. - 2011. - №6. - С.3-23.

Сасим С.А., Дриль С.И. Геохимия и Sr-Nd изотопная систематика пород шошнитовой и трахибазальтовой серий на примере мезозойских вулканитов Ингодинской, Усуглинской и Александрово-Заводской рифтогенных впадин Восточного Забайкалья // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 11. – Иркутск: Институт Земной коры СО РАН. – 2013. -С. 202–204.

Сасим С.А., Дриль С.И., Травин Т.А., Владимирова Т.А., Герасимов Н.С., Носкова Ю.В. Шошнит-латитовая серия Восточного Забайкалья: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст, геохимия и Sr-Nd изотопный состав пород Акатуевской вулканоплутонической ассоциации Александрово-Заводской впадины // Геология и геофизика. – 2016. - Т. 57 (5).- С. 962–982.

Шацкий В.С., Скузоватов С.Ю., Рагозин А.Л. Изотопно-геохимические свидетельства коровой контаминации эклогитов Кокчетавской субдукционно-коллизонной зоны. Геология и геофизика. - 2018. - Т. 59. - № 12. С. 1958-1978.

Ярмолюк В.В., Коваленко В. И. Геохимические и изотопные параметры аномальной мантии Северной Азии в позднем палеозое-раннем мезозое (данные изучения внутриплитного базитового магматизма) // Доклады академии наук. – 2000. - Т. 375. - № 4. - С. 525-530.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. – 2000. - № 5. -С. 3–29.

Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И., Покровский Б.Г. Магматизм и геодинамика Южно-Байкальской вулканической области (горячей точки мантии) по результатам геохронологических, геохимических и изотопных (Sr, Nd, O) исследований // Петрология. – 2003. - Т. 11 (1). - С.3–34.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта.

индикатор	Ед. измерения	Всего за 2017-2020 гг.	2017	2018	2019	2020
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	5	5	6		
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEBofScience)	единиц	5	4	5		
Число тезисов в конференциях	единиц	7	7	7		
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности: зарегистрированных патентов в России зарегистрированных патентов за рубежом	единиц	0	0	0	0	0

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2018г в соответствии с государственным заданием.

1. Шацкий В.С., Скузоватов С.Ю., Рагозин А.Л., Дриль С.И. Изотопно-геохимические свидетельства природы протолита эклогитов Кокчетавского массива (Казахстан) // ДАН. 2018. Т. 479. № 3. С. 329-332.
2. Skuzovatov, S.Yu., Shatsky, V.S., Dril, S.I., Perepelov, A.B., 2018. Elemental and isotopic (Nd-Sr-O) geochemistry of eclogites from the Zamtyn-Nuruu area (SW Mongolia): crustal contribution and relation to Neoproterozoic subduction-accretion events. *Journal of Asian Earth Sciences* 167, 33-51.
3. Шацкий В.С., Скузоватов С.Ю., Рагозин А.Л. Изотопно-геохимические свидетельства коровой контаминации эклогитов Кокчетавской субдукционно-коллизонной зоны. *Геология и геофизика*. 2018. Т. 59. № 12. С. 1958-1978.
4. Колесниченко М.В., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Литасов К.Д., Шацкий В.С. Роль эклогитов в перераспределении воды в субконтинентальной мантии Сибирского кратона: результаты определения содержаний воды в минералах эклогитов из трубки Удачная // *Геология и геофизика*. 2018. Т. 59 № 7. С. 951-971.
5. Zedgenizov D. A., Ragozin A. L., Shatsky V. S., Griffin W. L. Diamond formation during metasomatism of mantle eclogite by chloride-carbonate melt // *Contributions to Mineralogy and Petrology* (2018) 173:84
6. Перетяжко И.С., Савина Е.А., Дриль С.И. Трахибазальт-трахит-трахириолитовый раннемеловой вулканизм Нилгинской депрессии (Центральная Монголия): источники и эволюция состава магм в условиях континентального рифтогенеза // *Геология и геофизика*. 2018. Т. 59. № 12. С.2101-2128.
7. Бельков Д.А., Носкова Ю.В., Ильина Н.Н. Изотопно-геохимические особенности гранитоидов олекминского комплекса и метаморфических пород иргаинской свиты Восточного Забайкалья // *Вопросы естествознания*. Изд-во: ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения».- 2018. –Иркутск №2. (16) С.13-18.

Приложение 3.

Копия заданий для выполнения фундаментальных научных исследований по теме (проекту) "Изотопно-геохимические свидетельства мантийно-корового взаимодействия и рециклирования элементов" (0350-2016-0028) в 2018г.

1. Изотопно-геохимические исследования эклогитов из метаморфических комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса.
2. Исследование Sr-Nd-O-Pb изотопной систематики внутриплитовых вулканитов южного складчатого обрамления Сибирского кратона для реконструкции источников вещества мантийных расплавов, связанных с деятельностью Пра-Африканского суперплюма.