

Федеральное агентство научных организаций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ  
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА СИБИРСКОГО  
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 550.42:546.027  
№ госрегистрации АААА-А17-  
117061610019-3

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИГХ СО РАН  
д.г.-м.н. \_\_\_\_\_ Перепелов А.Б.

«\_\_» января 2018 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

Протокол Ученого совета ИГХ СО РАН  
№ \_1\_ от « 16 » января 2018 г.

Научный руководитель темы  
чл.-к. РАН

\_\_\_\_\_ В.С. Шацкий  
подпись, дата

Иркутск 2017

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, член-  
корр. РАН

В.С. Шацкий

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Ответственные исполнители темы:

член-корр. РАН

В.С. Шацкий (раздел 1)

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

кандидат геолого-минералогических  
наук

С.И.Дриль (раздел 2)

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

## Реферат

Отчет включает 26 стр., 9 илл., 9 ист., приложений 3.

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

Для выявления изотопно-геохимических свидетельств мантийно-корового взаимодействия в различных геодинамических обстановках и определения масштабов этого процесса был проведен следующий комплекс исследований.

Выяснено, что эклогиты Кокчетавского массива демонстрируют большой разброс в температурах равновесия (630-950<sup>0</sup>С). Изотопные исследования показали, что большинство эклогитов Кокчетавского массива имеют положительные значения  $\epsilon Nd(t)$  (от +1,35 до +8,1). Эклогиты с низкими значениями этой величины свидетельствуют о коровой контаминации протолитов. Свидетельством контаминации является образуемый эклогитами тренд от деплетированной мантии в сторону вмещающих пород. Полученные нами данные дают основание предполагать, что в качестве протолитов эклогитов Кокчетавского массива выступали базальты континентальных окраин, которые могут иметь геохимические характеристики базальтов различных типов MORB, а так же показывать особенности типичные для базальтов островных дуг как следствие контаминации континентальной корой.

Для выяснения этапов образования ювенильной коры Якутской алмазоносной провинции и ее модификации в ходе более поздних тектоно-термальных событий определен U-Pb возраст и изотопный состав гафния цирконов из коровых ксенолитов из кимберлитовых трубок Якутской алмазоносной провинции. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что тектонотермальные этапы 2,9-2,85 млрд.л., 2,75-2,7 млрд.л., 2,0-1,95 млрд.л. встречаются повсеместно в Анабарской тектонической провинции и могут отражать поднятие суперплюмов в периоды 2,9, 2,7 и 2 млрд.л.

Обоснована рамочная модель, описывающая природу источников вещества и взаимодействие между ними для основных и кислых пород трахибазальтовой серии позднемезозойских рифтогенных впадин Восточного Забайкалья. В рамках Sr-Nd изотопной систематики происхождение кислых вулканитов трахибазальтовой серии связано с взаимодействием умеренно истощенного мантийного и корового источников вещества при участии процессов флюидно-магматического перераспределения компонентов. Характер вариаций изотопного состава свинца в основных вулканитах трахибазальтовой серии позволяет уточнить картину взаимодействия источников вещества. Большая часть составов трахибазальтов располагаются вдоль линии смешения между мантийным ( $\mu=8,9$ ) и корово-

мантийным ( $\mu=9,4$ ) источниками вещества. Природа последнего источника может трактоваться как результат взаимодействия двух мантийных источников – деплетированного и обогащенного процессами палеозойской субдукции, широко проявленными по обрамлению Монголо-Охотского палеоокеана.

Содержание	
Введение	6
Основная часть	8
Раздел 1. Изучение метаморфических комплексов высоких и сверхвысоких давлений Центрально-Азиатского складчатого пояса как маркеров палеозон субдукции	8
1.1. Петрология и изотопная геохимия эклогитов Кокчетавского массива	8
1.2. Петрология и изотопная геохимия эклогитов юго-западной Монголии	12
1.3. Результаты датирования цирконов из коровых ксенолитов	14
Раздел 2. Исследование Sr-Nd-O-Pb изотопной систематики вулканитов трахибазальтовой серии Восточного Забайкалья для реконструкции источников вещества мантийных расплавов, связанных с деятельностью Пра-Африканского суперплюма.	16
Заключение	21
Список использованных источников	22
Приложение 1. Количество статей, опубликованных по тематике проекта в течение 2017 г. в соответствии с государственным заданием.	23
Приложение 2. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2017 г. в соответствии с государственным заданием.	24
Приложение 3. Копия заданий для выполнения фундаментальных научных исследований по теме (проекту) в 2017 г.	25

## 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 2017 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 исследования высокобарических пород эклогитов Кокчетавского массива и юго-запада Монголии, для которых определены с помощью имеющихся геотермобарометров P-T параметры равновесия. У эклогитов с контрастными параметрами определены содержания главных (метод РФА) и редких элементов (масс-спектрометр высокого разрешения с индуктивно-связанной плазмой ELEMENT-2). Проведены изотопно-геохимические исследования 20 образцов эклогитов с различных участков высокобарического пояса Кокчетавского массива. Проведено также датирование цирконов из нижнекоровых ксенолитов из кимберлитов Накынского и Верхнемунского полей, U-Pb методом LA-ICP-MS и в цирконах определен изотопный состав Hf.

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. 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 (Кузьмин, Ярмолюк, Кравчинский, 2011). Проведенные исследования изотопного состава Sr, Nd, Pb в вулканитах позднекайнозойской трахибазальтовой серии пород Восточного Забайкалья позволяют пролить свет на некоторые особенности процессов формирования последних.

Анализ изотопного состава неодима и стронция 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. Изучение метаморфических комплексов высоких и сверхвысоких давлений Центрально-Азиатского складчатого пояса как маркеров палеозон субдукции.

### 1.1. Петрология и изотопная геохимия эклогитов Кокчетавского массива.

Проведены изотопно-геохимические исследования 20 образцов эклогитов с различных участков высокобарического пояса Кокчетавского массива.

На участке Барчинском встречаются среднезернистые в разной степени амфиболизированные эклогиты. Помимо амфибола в ряде эклогитов присутствует фенгит (В 11-33, Л 03-28). Встречаются эклогиты с карбонатом (Б 50-04, Б 11-27). В ряде эклогитов наблюдаются прожилки сложенные кварцем, омфацитом и амфиболом (Л 03-23, Б 24-04, Б 11-28). Температуры равновесия эклогитов этого участка, рассчитанные по гранат-пироксеновому геотермометру (Ellis, Green, 1979, Krogh-Ravna, 2000) варьируют от 630 до 900<sup>0</sup>С.

На участке Кулет наряду со среднезернистыми эклогитами, сложенными омфацитом, гранатом и кварцем присутствуют эклогиты с амфиболом, цоизитом и фенгитом.

Температуры равновесия эклогитов участка Кулет варьируют от 630 до 840<sup>0</sup>С.

Эклогиты участка Сулу-Тюбе (Ст 95-3, Ст 11-1) представлены разновидностями с порфиробластами граната. Минералы матрикса представлены омфацитом, амфиболом и цоизитом. Минеральная ассоциация включений свидетельствует о том, что в качестве протолита эклогитов выступали метабазиты эпидот-амфиболитовой фации. Расчетные температуры равновесия 600-650<sup>0</sup>С.

Эклогит К-К 88-1 участка Кумды-Коль сложен гранатом, омфацитом и кварцем. По омфациту интенсивно развивается пироксен-плаггиоклазовый симплектит. Температуры равновесия эклогитов этого участка 800-950<sup>0</sup>С.

В эклогитах с контрастными Р-Т параметрами проведено определение редкоэлементного и изотопного состава неодима и стронция. Определение концентраций редких элементов выполнено на масс-спектрометре высокого разрешения с индуктивно-связанной плазмой ELEMENT-2.

Эклогиты участка Барчинский на диаграмме (Рис. 1а), нормированной на хондрит демонстрируют разный характер распределения редкоземельных элементов. Часть эклогитов имеет волнообразное распределение РЗЭ. Они характеризуются слабым положительным наклоном от лютеция до европия и слабым отрицательным от неодима до лантана (Л 03-28). Эклогиты Б11-28, Б 50-04 и Б11-26 в разной степени обогащены легкими редкими землями



$(La/Yb)_N$  1,52-1,86. Эклогиты Б 11-27, Б 11-35, Б 11-25, Л 03-23, напротив, деплетированы легкими редкими землями  $(La/Yb)_N$  0,89-0, 35. Наиболее сильно деплетирован образец Л 03-23 (Рис. 1а).

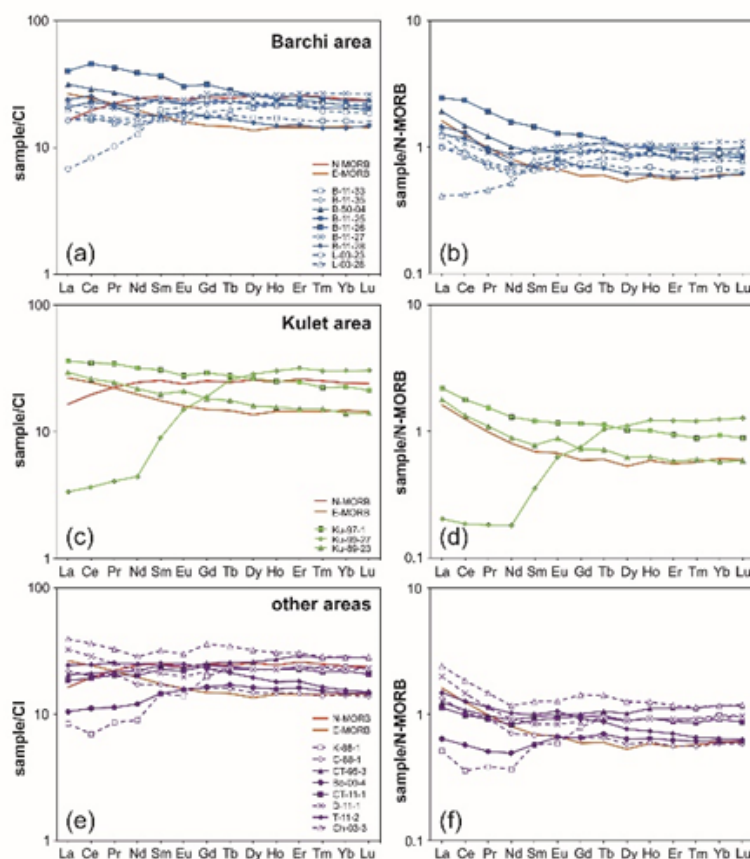


Рисунок 1. Распределение редкоземельных элементов в эклогитах номированных на хондрит (a,c,e) и N-MORB (b,d,f).

На диаграмме, нормированной на N-MORB (Рис. 1b), эклогиты Б 11-25, 27,35,33, Л 03-23 показывают распределение, близкое к N-MORB, в то время как эклогиты Б 11-26,28 и Б 50-04 обогащены редкими землями и близки к E-типу MORB. Эклогит Л 03-28 деплетирован легкими редкими землями относительно N-MORB.

Два эклогита участка Кулет (Ку 89-23, 97-1) на диаграмме (Рис. 1c) номированной на хондрит имеют характер распределения редкоземельных элементов, близкий к E-типу. У эклогита Ку 89-23 наблюдается слабая положительная аномалия по европию. Образец Ку 99-27 сильно деплетирован легкими редкими землями  $(La/Yb)_N$  0,11). У него наблюдается крутой положительный наклон от диспрозия до неодима и слабый отрицательный от неодима до лантана (Рис. 1c). На диаграмме, нормированной на N-MORB эклогиты Ку 89-23, Ку 97-1 имеют отрицательный наклон от неодима до лантана (Рис. 1d). В то же время образец Ку 99-27, сильно деплетированный легкими РЗЭ имеет крутой положительный

наклон от диспрозия до неодима и ровное распределение от неодима до лантана. Эклогиты участков Сулу-Тюбе (Ст 95-3, Ст 11-2) и Боровое (Бо 00-04) имеют характер распределения РЗЭ, близкий к N-MORB (Рис. 1е). Однако эклогит участка Боровое имеет величину Sm/Nd, значительно больше хондритового. Эклогит участка Кумды-Коль К 88-1 в значительной степени деплетирован легкими редкими землями ((La/Yb)<sub>N</sub> 0,35. На диаграмме, нормированной на N-MORB, эклогит показывает положительный крутой наклон от тербия до неодима. Эклогиты других участков в различной степени обогащены легкими РЗЭ (La/Yb)<sub>N</sub>= 1,40-1,56. Эклогит С 88-1 имеет характер распределения, близкий к E-типу.

На мультиэлементной диаграмме (Рис. 2) три эклогита демонстрируют распределение, близкое к N-MORB (Ст 95-3, Ст 11-1, Во 00-4). Четыре образца имеют распределение, близкое к E-типу (Ку 89-23, В 50-04, Ку 97-1, Ч 03-3). У 6 образцов наблюдается деплетирование по ниобию (Б11-33, Д 11-1, Т 11-2, Л 03-28, Б 11-26, С 88-1). Остальные эклогиты занимают промежуточное положение.

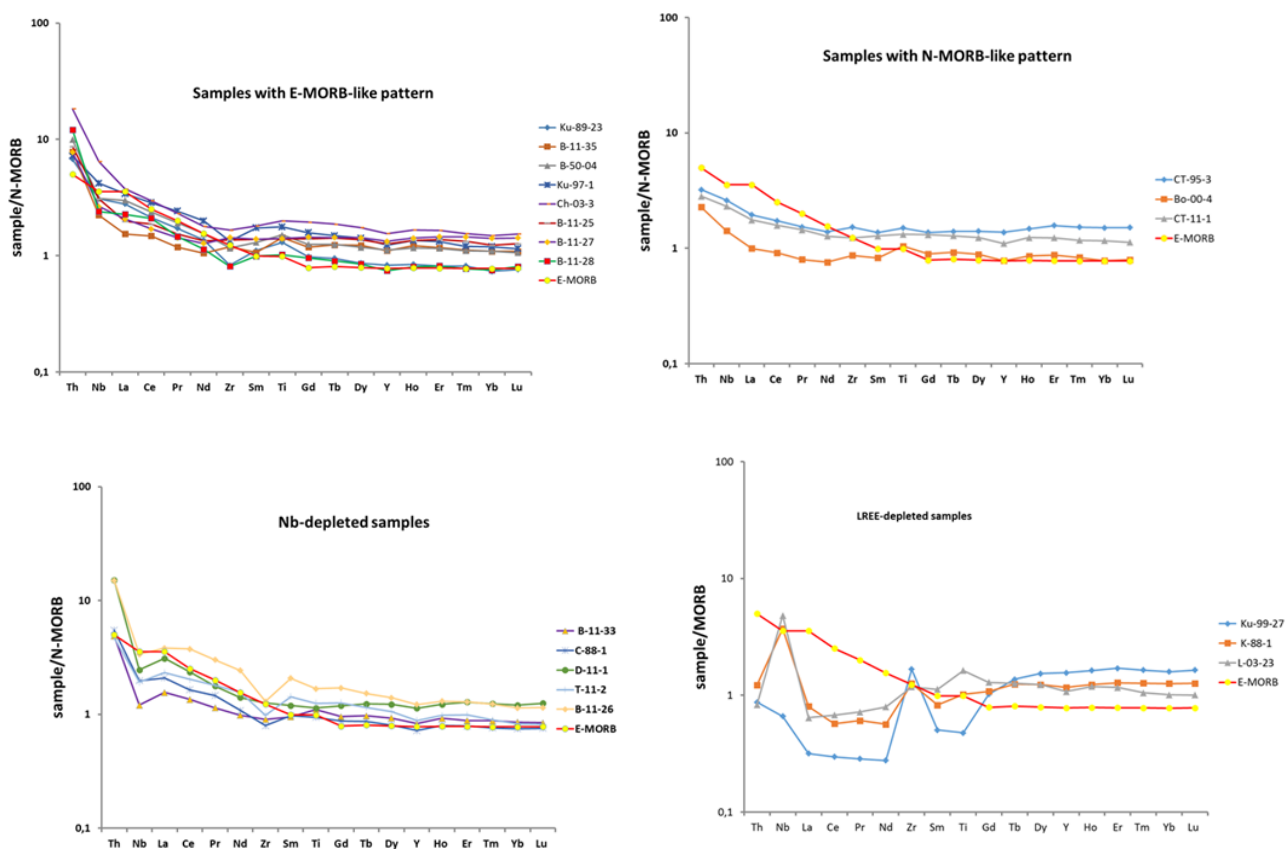


Рисунок 2. Распределение наименее мобильных несовместимых элементов в эклогитах Кокчетавского массива, нормированных на N-MORB

Эклогиты характеризуются широкими вариациями отношения  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  (0.1307-1.2189) и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0,70393-0,78447), что видно из Рис. 3. В то же время отсутствует зависимость между величиной отношения  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  и изотопным составом стронция.

Наиболее близкое значение отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  к N-MORB имеет эклогит Сулу-Тюбе (Ст 95-3).

Эклогиты Кокчетавского массива демонстрируют большой разброс в величинах  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  (от 0.367 до 0.143). Величина  $\epsilon\text{Nd}(530)$  варьирует от  $-10,3$  до  $+8,1$ . На графике в координатах  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  -  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  эклогиты не показывают линейную зависимость изотопного состава неодама от величины  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ , как это следует из Рис. 3. Это может свидетельствовать о том, что Sm-Nd система была нарушена в ходе одного из этапов в истории эклогитов или протолиты эклогитов имели разные мантийные источники.

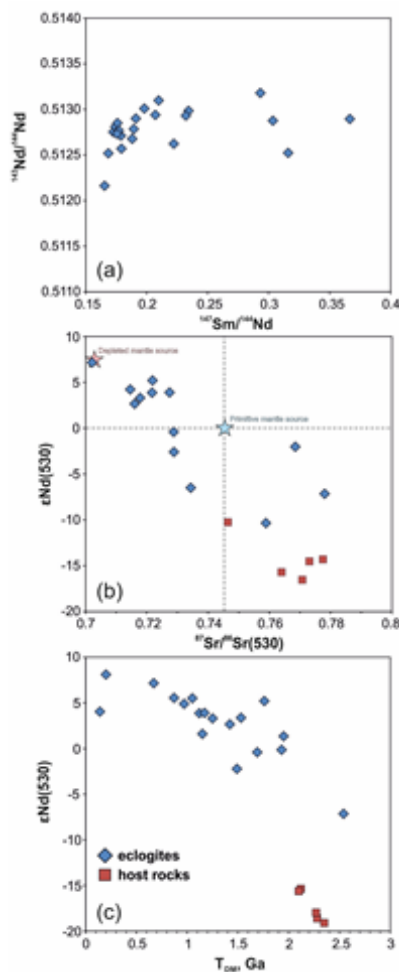


Рисунок 3. Диаграммы зависимости  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  -  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  (a);  $\epsilon\text{Nd}(T)$  -  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  (b);  $\epsilon\text{Nd}(T)$  -  $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$  (c) и  $\epsilon\text{Nd}(T)$  -  $T(\text{DM})$ , для эклогитов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

У наиболее деплетированных в отношении ЛРЗЭ эклогитов величины Sm/Nd отношений выше, чем у деплетированной мантии, в то же время величины  $\epsilon\text{Nd}(T)$  значительно ниже  $\epsilon\text{Nd}(T)$  деплетированной мантии как следует из Рис. 3. Вариации модельных возрастов (TDM) эклогитов лежат в интервале 1.95-0.67 млрд. лет. Наименьшее значение возраста имеет эклогит участка Сулу-Тюбе, у которого значения  $\epsilon\text{Nd}(530)$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  близки к деплетированной мантии. На графиках зависимости в координатах  $\epsilon\text{Nd}(T)$

-  $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$  и  $\epsilon\text{Nd}(T) - T(\text{Nd})$ , показанных на Рис. 3, эклогиты образуют тренды, которые могут интерпретироваться как результат контаминации протолитов эклогитов вмещающими породами. Большие значения величин  $\text{Sm}/\text{Nd}$  отношений и деплетирование ряда эклогитов относительно N-MORB ЛРЗЭ может свидетельствовать о процессе плавления в зоне субдукции в присутствии граната. При этом только отдельные образцы эклогитов показывают геохимические свидетельства плавления.

## 1.2. Петрология и изотопная геохимия эклогитов юго-западной Монголии.

Изученные эклогиты из комплекса Алаг-Хадны юго-западной Монголии представляют собой преимущественно в различной степени ретроградно измененные средне-крупнозернистые породы (размер зерен от 100 мкм до нескольких мм), массивные с гранобластовой структурой и близкие к полосчатым с нематогранобластовой структурой, обусловленной ориентированными вытянутыми зернами клинопироксена и амфибола.

Значения температуры по геотермометрам, основанным на Mg-Fe-обменных реакциях между гранатом и клинопироксеном, лежат в интервале  $520\text{-}540^\circ\text{C}$  и  $505\text{-}515^\circ\text{C}$  (Ellis and Green, 1979) в расчете на величину давления 15 кбар. Оценки минимального давления по содержанию жадеита в омфациите составляют 13-14 кбар в расчете на  $600^\circ\text{C}$ . Стоит отметить, что оценки температуры и давления могут быть существенно выше в связи с существенной неопределенностью в расчете содержания двухвалентного железа в клинопироксене.

На дискриминантных диаграммах с использованием наименее подвижных элементов (HFSE, Y, Th), которые показаны на Рис. 4 точки состава эклогитов попадают в поля базальтов островных дуг и океанического дна. Близость к океаническим базальтам выражается в низких отношениях  $\text{Th}/\text{Yb}$  (0.25-0.29), существенно повышенном только для эклогита ЦУ-15-67 (0.60),  $\text{Nb}/\text{Yb}$  (1.24-2.44) (заметно выше значения для N-MORB, но ниже значений для E-MORB и континентальной коры), тогда, как по отношениям  $\text{Lu}/\text{Hf}$  (0.12-0.18) и  $\text{Sm}/\text{Nd}$  (0.29-0.33) эклогиты наиболее схожи с островодужными базитами. В то же время по характеру распределения несовместимых элементов они значительно отличаются от островодужных базальтов, в частности по отсутствию отрицательных аномалий по танталу и ниобию. Индикаторные элементные отношения  $\text{Th}/\text{Nb}$  (0.13-0.25),  $\text{La}/\text{Nb}$  (1.08-1.32),  $\text{Ce}/\text{Nb}$  (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.

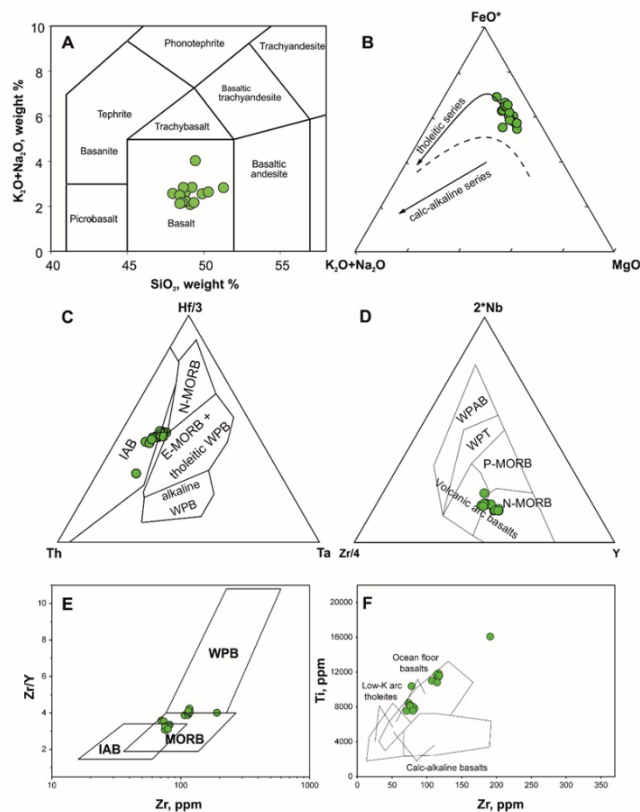


Рисунок 4. Некоторые петрогенные и редкоземельные характеристики эклогитов юго-западной Монголии.

Кривые распределения редкоземельных элементов, нормированные на углистый хондрит CI (Sun and McDonough, 1989), демонстрируют слабый отрицательный наклон от тяжелых к легким РЗЭ (Рис. 5А). Отношения La/Ybn и Gd/Ybn находятся в диапазоне 1.04-1.78 и 1.11-1.60, соответственно. У спектров распределения РЗЭ четырех эклогитов наблюдается слабая отрицательная Eu аномалия. Один эклогит (ЦУ-15-67) с наибольшей величиной отношения La/Ybn 1.78 имеет также наибольшее общее содержания РЗЭ (120 ppm) и других редких элементов.

Мультиэлементные диаграммы для эклогитов, нормированные на состав примитивной мантии, 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, как это следует из Рис. 5Б. Содержание крупноионных литофильных элементов (Cs, Rb, Ba, K, Sr) и Pb (все на графике не показаны) имеет значительные вариации, вероятно обусловленные мобильностью указанных элементов. 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.

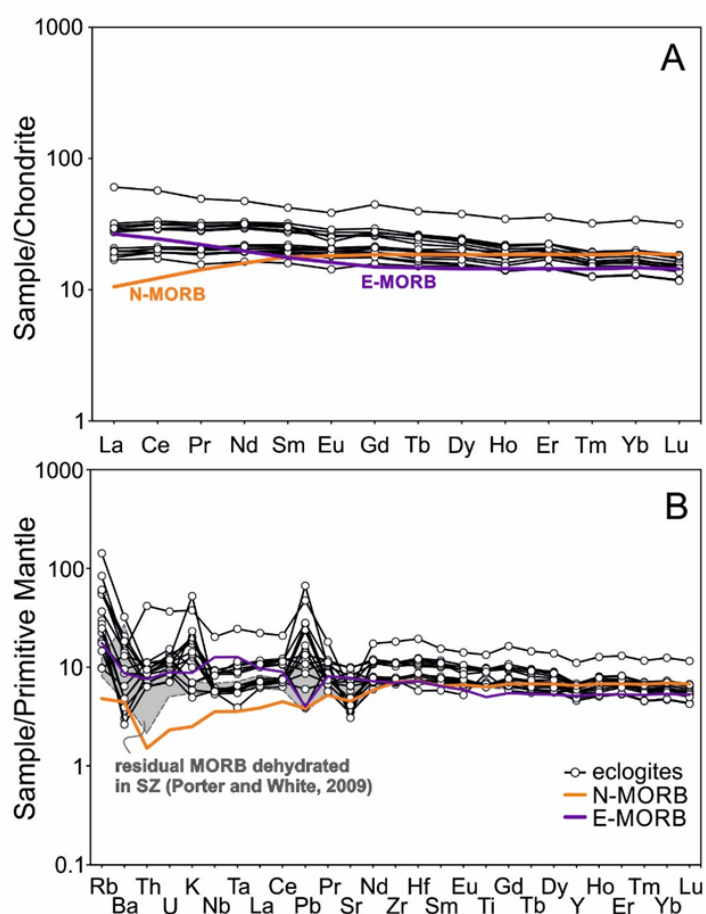


Рисунок 5. Редкоземельные и мультиэлементные спектры эклогитов юго-западной Монголии.

### 1.3. Результаты датирования цирконов из коровых ксенолитов.

Проведено датирование цирконов из ксенолитов в кимберлитах U-Pb методом LA-ICP-MS и определение в цирконах изотопного состава Hf.

Для Накынского кимберлитового поля цирконы были выделены из ксенолита среднего гранулита Бт7-03 (Grt+Qtz+Pl+Opx+Vt+Ap) и основного Бт39-03 (Grt+Pl+Qtz+Cpx+Scp) составов.

В трубке Ботубинская цирконы из ксенолита среднего гранулита Бт7-03 удлиненно-призматические (3,7-3:1) и округлые (1,5-1:1), размер 100-150 мкм. У ряда зерен наблюдаются идиоморфные ядра с осциляторной зональностью и кайма без зональности. Для образца Бт7-03 цирконы дают ряд конкордантных возрастов от  $2942 \pm 12$  до  $2630 \pm 13$  млн.л. Зерна с наиболее древними возрастaми (2,94-2,9 млрд.л) имеют удлиненно-призматический габитус и в них отсутствует зональность. Десять зерен образуют кластер с конкордантным возрастом  $2782 \pm 9,3$  млн.л. На графике относительной вероятности выделяется ряд пиков (2,94, 2,87, 2,78, 2,7 млрд.л.) с наиболее выраженным 2,78 млрд.л.

В ксенолите основного гранулиты Бт39-03 преобладают цирконы округлой морфологии с отсутствием зональности или более ярко люминисцирующей центральной частью и более темной каймой. Цирконы образуют дискордию с верхним пересечением  $2750 \pm 19$  млн.л. и нижним  $2013 \pm 41$  млн.л. Конкордантные возраста лежат в интервале 2026-2770 млн.л., при этом главный пик соответствует 2,75 млрд.л. На графике относительной вероятности выделяется главный пик 2,73 млрд.л. и присутствует пик 2,03 млрд.л.

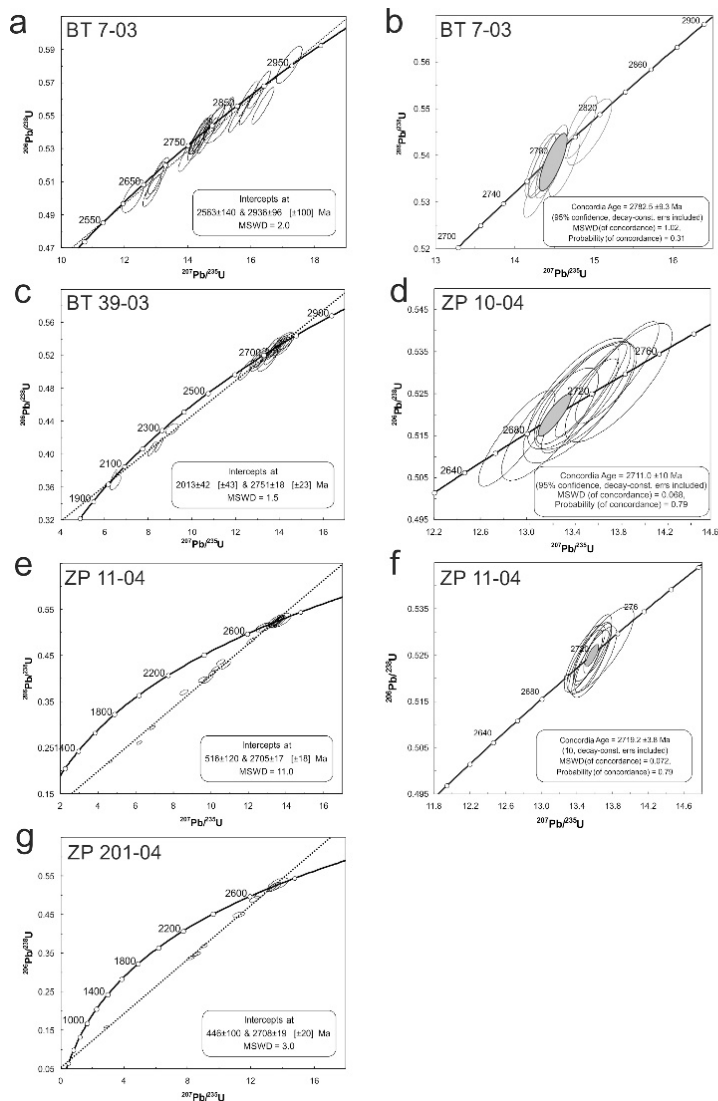


Рисунок 6. Диаграммы с конкордией для цирконов из коровых ксенолитов.

Таким образом у цирконов из ксенолитов трубки Ботуобинская фиксируются следующие тектоно-термальные этапы: 2,94; 2,78; 2,7; 2,0 млрд.л.

Для Верхнемунского кимберлитового поля цирконы были выделены из двух образцов гранат-пироксеновых гнейсов Зп11-04, Зп 10-04 ( $\text{Gt}+\text{Cpx}+\text{Orx}+\text{Pl}+\text{Kfsp}+\text{Qz}+\text{Amf}+\text{Bt}$ ) и одного образца среднего дупироксенового гранулиты Зп 201 ( $\text{Cpx}+\text{Orx}+\text{Bt}+\text{Amf}+\text{Pl}+\text{Kfsp}$ ).

В ксенолите Зп11-04 из 20 зерен 10 дискордантны (больше, чем интервал 95-105 %). Остальные зерна образуют дискордию с верхним пересечением  $2714 \pm 9,5$  млн.л., что следует

из Рис. 6. Зерна, имеющие осциляторную зональность могут быть как конкордантными, так и дискордантными.

В ксенолите Зп10-04 из 21 проанализированных зерен цирконов 8 дискордантны, что видно из Рис. 6. Десять конкордантных зерен образуют кластер с возрастом  $2711 \pm 11$  млн.л. Одно зерно дает конкордантный возраст  $2408 \pm 54$  млн.л.

У цирконов из двупироксенового гранулита Зп 201-04 из 11 проанализированных зерен только 5 показывают дискордантность меньше 10%. Цирконы образуют конкордию с верхним пересечением  $2708 \pm 19$  млн.л. как это следует из Рис. 6.

У цирконов из ксенолита Бт39-03 с конкордантными возрастaми 2,74-2,7 млрд.л. величины  $Hf_{initial}$  варьируют от 0,28099 до 0,28108, что видно на Рис. 7. Цирконы молодой генерации имеют такой же изотопный состав, как и древние. Это согласуется с удалением свинца или рекристаллизацией цирконов в ходе тектонотермального этапа с возрастом 2,0 млрд.л. Исследованные цирконы имеют модельный возраст  $T_{DM}(Hf)$  в интервале от 3.16 до 2.94 млрд.л. Это свидетельствует об интенсивной переработке коры ниже Накынского кембирлитового поля 2 млрд.л. назад. Цирконы из среднего и основного гранулитов Ботубинской трубки имеют субхондритовые значения  $\epsilon_{Hf}(T)$ . Наиболее ранний тектонотермальный этап отвечает возрасту 2.94-2.87 млрд.л. Модельный возраст цирконов лежит в интервале 3.42-3.11 млрд.л. Это предполагает, что кора была образована в палеоархее (>3 млрд.л) и переплавлена с образованием цирконов с возрастом 2.94-2.9 млрд.л. В последующем эти цирконы были перекристаллизованы в ходе тектонотермального этапа 2,8-2,7 млрд.л.

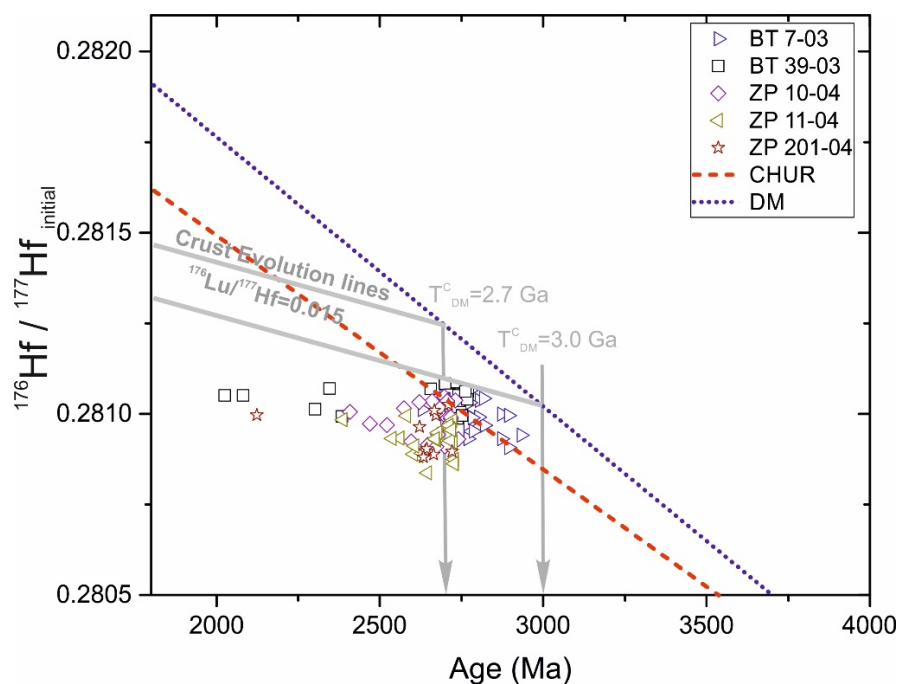




Рисунок 7. График U-Pb -  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  для цирконов из коровых ксенолитов кимберлитовых трубок Заполярная и Ботуобинская

Раздел 2. Исследование Sr-Nd-O-Pb изотопной систематики вулканитов трахибазальтовой серии Восточного Забайкалья для реконструкции источников вещества мантийных расплавов, связанных с деятельностью Пра-Африканского суперплюма.

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. 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 (Кузьмин, Ярмолюк, Кравчинский, 2011). Проведенные исследования изотопного состава Sr, Nd, Pb в вулканитах позднекайнозойской трахибазальтовой серии пород Восточного Забайкалья позволяют пролить свет на некоторые особенности процессов формирования последних.

Изотопная Sr-Nd систематика трахибазальтов Ингодинской, Усуглинской, Кыкоро-Акиминской, Оловской, Бадинской и Харанорской впадин, представленная на Рис. 8, позволила выявить достаточно протяженный тренд от относительно деплетированных составов ( $e\text{Nd}(t)=5,5$  и  $0,5-1,2$ ) к умеренно обогащенным разновидностям ( $e\text{Nd}(t)=-1,3$  –  $(-3,3)$ ). Величины  $e\text{Nd}(t)=-1,3$  -  $(-3,3)$ . При этом величины  $I(0)\text{Sr}=0,70438-0,70608$ , что определенно свидетельствует о контаминации некоторых порций трахибазальтовых расплавов коровым веществом. Это подтверждается и совпадением точек составов пород с модельным трендом смешения основного мантийного и кислого корового вещества. Таким образом, интерпретация Sr-Nd изотопной систематики трахибазальтов может быть описана в рамках модели смешения умеренно истощенного мантийного и корового источников вещества. Изотопный состав кислорода также указывает на взаимодействие основных пород с коровым субстратом, т.к. величины  $\delta^{18}\text{O}$  лежат в пределах от +5.3 до +8.2.

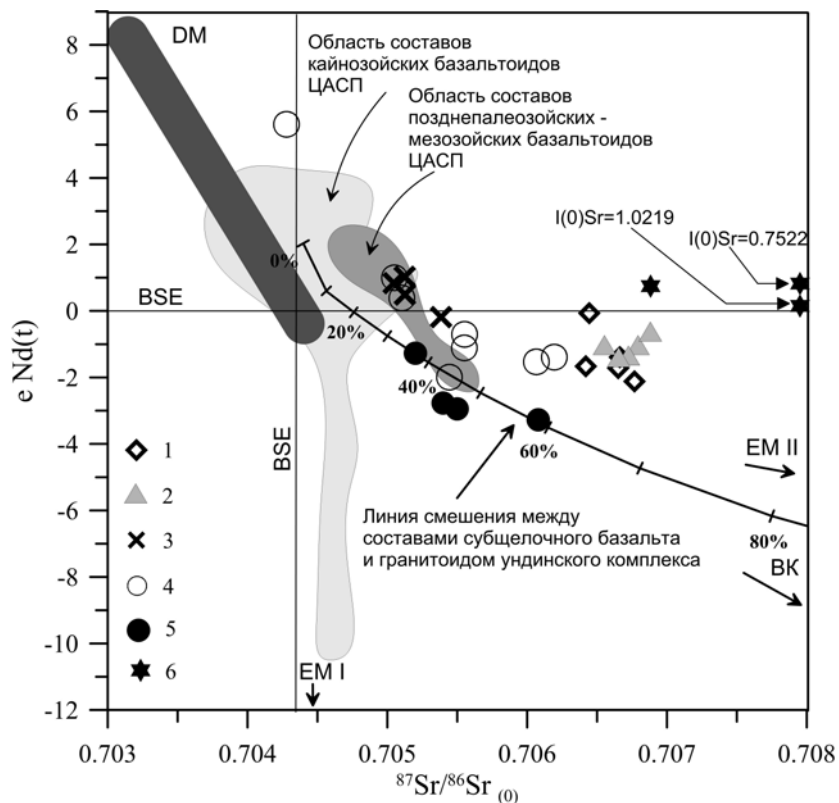


Рисунок 8. Изотопная диаграмма  $\epsilon\text{Nd}(t) - {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}(0)$  для пород трахибазальтовой и шошонит-латитовой серий Восточного Забайкалья.

Условные обозначения: 1-2 – породы Акатуевской вулканоплутонической ассоциации Александрово-Заводской впадины (шошонит-латитовая серия): 1 – породы ранней и главной фаз Акатуевского массива, 2 – вулканиты нижней пачки кайласской свиты; 3 – вулканиты верхней пачки кайласской свиты Александрово-Заводской впадины (трахибазальтовая серия); 4 – верхнеюрско-раннемеловые трахибазальты Ингодинской, Усуглинской, Оловской и Кыкоро-Акиминской впадин по (Сасим, Дриль, 2013); 5 - верхнеюрско-раннемеловые трахибазальты Бадинской и Харанорской впадин; 6 – раннемеловые кислые вулканиты тургинской свиты Александрово-Заводской впадины. Области составов поднепалеозойских, мезозойских, кайнозойских внутриплитовых базальтоидов Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) приведены по (Ярмолюк и др., 2000). Линия смешения рассчитана между модельным составом внутриплитового базальта из выборки (Ярмолюк и др., 2003) и гранитом ундинского комплекса (Дриль и др., 2006).

Изотопный состав неодима в кислых породах – трахидацитах и трахириолитах тургинской свиты - характеризуется слабopоложительными величинами  $\epsilon\text{Nd}(t) = 0,2-(+0,7)$ , что указывает на генетическую связь с умеренно истощенным источником вещества и совпадает с характеристиками трахибазальтов верхней пачки кайласской свиты. При этом кислые вулканиты имеют типично коровые ( ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}_{(145 \text{ MA})} = 0,70729-0,72805$ ), а часто и высокоррадиоогенные ( ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}_{(145 \text{ MA})} = 0,75217-1,02186$ ), значения первичного отношения изотопного состава стронция. Подобные «контрастные» Sr-Nd изотопные характеристики, присущие ряду кислых вулканитов тургинской свиты, вероятно, обусловлены не только магматическим процессом, но также и флюидно-магматическим взаимодействием на завершающей стадии эволюции магматической системы. Таким образом, генезис кислых вулканитов трахибазальтовой серии сочетает в себе взаимодействие умеренно истощенного

мантийного и корового источников вещества при участии процессов флюидно-магматического перераспределения компонентов.

Характер вариаций изотопного состава свинца (Рис. 9), в основных вулканитах трахибазальтовой серии позволяет уточнить картину взаимодействия источников вещества. Так, большая часть составов трахибазальтов располагаются вдоль линии смешения между мантийным ( $\mu=8,9$ ) и корово-мантийным ( $\mu=9,4$ ) источниками вещества. Природа последнего источника может трактоваться двояко. С одной стороны - это может быть результат смешения мантийного и корового компонентов в результате контаминации мантийных трахибазальтовых магм верхнекоровым веществом. С другой – как результат взаимодействия двух мантийных источников – деплетированного и обогащенного процессами палеозойской субдукции, широко проявленными по обрамлению Монголо-Охотского палеоокеана. Следует отметить, что изотопный состав свинца современных островодужных базальтов, исследованных авторами отчета на примере пород северного сектора Курильской островной дуги, близок к корово-мантийному источнику с  $\mu=9,4$ . Это может указывать на то, что «корово-мантийный» источник вещества с такими изотопными характеристиками, характерными для многих базитов Монголо-Охотского орогенного пояса (Чугаев и др., 2013, Дриль, 2015), представляет собой мантийный источник, модифицированный субдукционными процессами. Это заключение для своего обоснования требует дальнейших исследований.

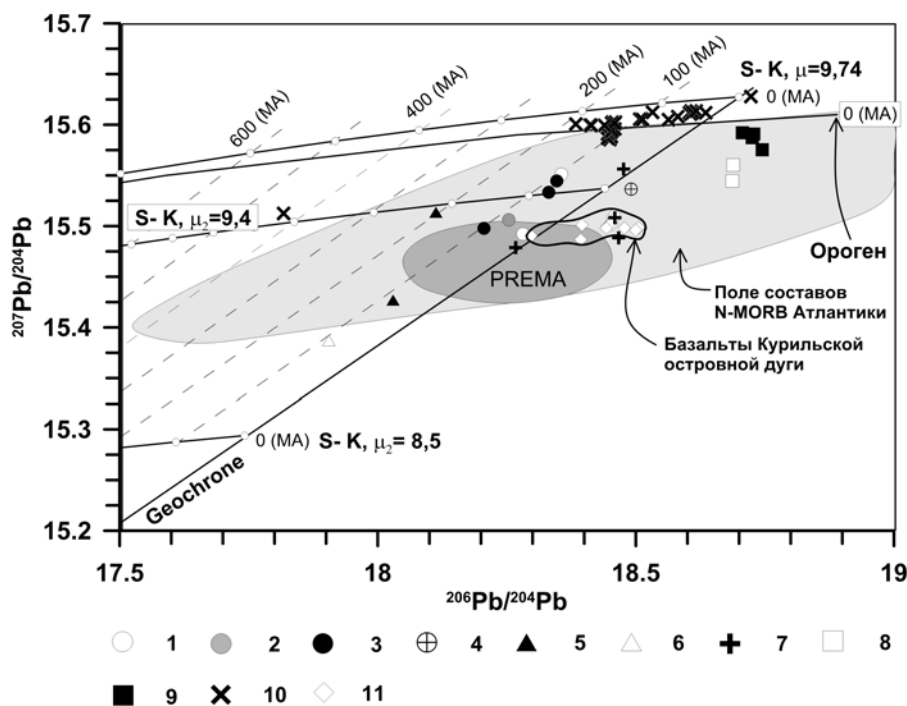


Рисунок 9. Диаграмма зависимости  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для вулканитов трахибазальтовой серии позднемезозойских рифтогенных впадин Восточного Забайкалья.

Условные обозначения. Составы рассеянных свинцов трахибазальтов следующих рифтогенных впадин: 1 – Ингодинской, 2 – Усуглинской, 3 – Оловской, 4 – района оз.Хараганаш, 5 – Кыкоро-Акиминской, 6 – Бадинской, 7 – Харанорской, 8 – Александрово-Заводской (кислые вулканы), 9 – Александрово-Заводской (шошониты); 10 – составы галенитов полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья (Чугаев и др., 2013, Дриль, 2015); 11 – составы базальтов Курильской островной дуги (неопубликованные данные авторов отчета).

## Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что в качестве протолитов эклогитов Кокчетавского массива выступали в различной степени контаминированные континентальной корой базальты N-type MORB.

Изотопные данные дают основание считать, что протолиты эклогитов Кокчетавского массива были контаминированы древним коровым компонентом. На диаграммах в координатах  $\epsilon\text{Nd-T}$ ,  $\epsilon\text{Nd} - 87\text{Sr}/86\text{Sr}$  эклогиты образуют тренды, протягивающиеся в сторону вмещающих пород

Наиболее молодой неопротерозойский модельный возраст (670 млн.л.) получен для образца эклогита участка Сулу-Тюбе, геохимические особенности которого наиболее близки к N-MORB. Этот возраст отвечает периоду распада Родинии, развития деструктивных рифтогенных процессов в Тарим-Тяньшань-Казахстанском палеоконтиненте.

Датирование цирконов из коровых ксенолитов показало, что тектонотермальные этапы 2.9-2.85, 2.75-2.7, 2.0-1.95 встречаются повсеместно на Сибирском кратоне. Это дает основание предположить, что эти тектонотермальные этапы связаны с подъемом суперплюмов. Наши данные свидетельствуют о существовании палеоархейской коры во всех террейях Якутской алмазоносной провинции, что свидетельствует о том, что основной объем коры был образован в палеоархее.

Обоснована рамочная модель, описывающая природу источников вещества и взаимодействие между ними для основных и кислых пород трахибазальтовой серии позднемезозойских рифтогенных впадин Восточного Забайкалья. Изотопная Sr-Nd систематика трахибазальтов свидетельствует об участии в их генезисе умеренно истощенного мантийного и корового источников вещества. В рамках Sr-Nd изотопной систематики происхождение кислых вулканитов трахибазальтовой серии связано с взаимодействием умеренно истощенного мантийного и корового источников вещества при участии процессов флюидно-магматического перераспределения компонентов. Характер вариаций изотопного состава свинца в основных вулканитах трахибазальтовой серии позволяет уточнить картину взаимодействия источников вещества. Большая часть составов трахибазальтов располагаются вдоль линии смешения между мантийным ( $\mu=8,9$ ) и корово-мантийным ( $\mu=9,4$ ) источниками вещества. Природа последнего источника может трактоваться как результат взаимодействия двух мантийных источников – деплетированного и обогащенного процессами палеозойской субдукции, широко проявленными по обрамлению Монголо-Охотского палеоокеана.

## Список использованных источников

1. Кузьмин, М. И. Фанерозойский внутриплитовый магматизм Северной Азии: абсолютные палеогеографические реконструкции Африканской низкоскоростной мантийной провинции [Текст] / М. И. Кузьмин, В. В. Ярмолюк, В. А. Кравчинский // Геотектоника. - 2011. - №6. - С.3-23.
2. Ellis, D.G. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria [Текст] / D. G. Ellis, D. H. Green // Contributions to Mineralogy and Petrology. -1979. -V. 71. P. 13-22.
3. Krogh Ravn. The garnet-clinopyroxene  $Fe^{2+}$ -Mg geothermometer: an updated calibration [Текст] // Journal of Metamorphic Geology. – 2000. - V.18. - № 2. -P. 211-219.
4. Sun, S.-S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [Текст] / S. - S. Sun, W. F. McDonough // Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, A. D. Saunders, M. J. Norry (eds), Published for The Geological Society by Blackwell Scientific Publications. - 1989. - No. 42, - P. 313-345.
5. Сасим, С.А. Геохимия и Sr-Nd изотопная систематика пород шoshнитовой и трахибазальтовой серий на примере мезозойских вулканитов Ингодинской, Усуглинской и Александрово-Заводской рифтогенных впадин Восточного Забайкалья [Текст] / С. А. Сасим, С. И. Дриль // 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.
6. Ярмолюк, В.В. Геохимические и изотопные параметры аномальной мантии Северной Азии в позднем палеозое-раннем мезозое (данные изучения внутриплитного базитового магматизма) [Текст] / В. В. Ярмолюк, В. И. Коваленко // Доклады академии наук. – 2000. - Т. 375. - № 4. - С. 525-530.
7. Дриль, С.И. Субдукционно-аккреционные комплексы Монголо-Охотского пояса и их роль в процессах фанерозойского гранитообразования: опыт Sr-O-Nd изотопной систематики гранитов [Текст] / С. И. Дриль, Б. Г. Покровский, С. А. Татарников, В. Д. Козлов, Г. П. Сандмирова, М. В. Елизарова, Ю. Л. Ронкин // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма. Материалы III Российской конференции по изотопной геохронологии: ИГЕМ РАН. ГЕОС. - Москва. - 2006. - Т.1. - С.225-230.
8. Чугаев, А.В. Изотопно-свинцовые рудные провинции Восточного Забайкалья и их связь со структурами региона (по данным высокоточного MC-ICP-MS-изучения изотопного состава Pb) / А.В. Чугаев, И.В. Чернышев, Н.С. Бортников, В.А. Коваленкер., Г.Д. Киселева, В.Ю. Прокофьев // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55. – № 4. – С.282–294.

9. Дриль, С.И. Изотопный состав свинца полиметаллических руд Ново-Широкинского месторождения Восточного Забайкалья: источники вещества и возможная связь с позднемезозойским внутриплитовым магматизмом региона // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2015. - № 3 (52). - С. 7-12.

---

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			
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEBofScience)	единиц	5	4			
Число тезисов в конференциях	единиц	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 2017г в соответствии с государственным заданием.**

1. Скузоватов С.Ю., Шацкий В.С., Дриль С.И. Высокобарические мафические гранулиты Южно-Муйской глыбы (Центрально-Азиатский складчатый пояс) // Доклады Академии наук. 2017. Т. 473. №. 4. С. 472-476. doi:10.1134/S1028334X17040067

2. Skuzovатов, S.Yu., Noskova, Yu.V., Dril, S.I., Wang, K.-L., Iizuka, Y., 2017. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology, Nd-Hf isotopic characteristics and tectonic implications of the South Muya block metasediments (northeastern Central Asian Orogenic Belt) // Geodynamics & Tectonophysics 8(3), 565-568. doi:10.5800/GT-2017-8-3-0292

3. Skuzovатов S.Y., Zedgenizov D.A., Rakevich A.L. Spectroscopic constraints on growth of Siberian mixed-habit diamonds // Contributions to Mineralogy and Petrology, 2017, V.172, № 6, art. no. 46. (ИФ = 2,913) doi:10.1007/s00410-017-1366-9

4. Dril S.I., Noskova Yu.V., Wang K.-L., Belyaev V.A., Skuzovатов S.Yu., Grigoriev D.A., Belkov D.A. 2017. Geochronology and Sr-Nd isotope geochemistry of Late Paleozoic collisional granitoids of Undinsky complex (Eastern Transbaikal region) // Geodynamics & Tectonophysics, 2017, Т. 8, № 3, С. 455-459. doi:10.5800/GT-2017-8-3-0261.

5. Степанов Ф.А., Емельянова А.С., Ракевич А.Л., Миронов В.П., Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С., Мартынович Е.Ф. Локализация дефектов 523 и 794 нм в алмазе // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2017, Т. 81, № 9, С. 1220-1226 (Scopus) doi: 10.3103/S1062873817090246

### **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 2017г.**

1. Изучение метаморфических комплексов высоких и сверхвысоких давлений Центрально-Азиатского складчатого пояса как маркеров палеозон субдукции.

2. Исследование Sr-Nd-O-Pb изотопной систематики вулканитов трахибазальтовой серии Восточного Забайкалья для реконструкции источников вещества мантийных расплавов, связанных с деятельностью Пра-Африканского суперплюма.