

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 01201351654



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН

чл.-корр. РАН

В.С.Шацкий

« 23 » декабря 2016г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА МАНТИЙНО-КОРОВОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И РЕЦИКЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

№ 0350-2014-0005

(заключительный)

Приоритетное направление VIII.71. 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.
Программа ФНИ СО РАН VIII.71.1. Процессы мантийно-корового взаимодействия и изотопно-геохимические индикаторы рециклирования элементов.

Протокол Ученого совета ИГХ СО РАН

№ 7 от « 21 » декабря 2016 г.

Научный руководитель темы
чл.-к. РАН

подпись, дата

В.С. Шацкий

Иркутск 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, член-
корр. РАН


_____ 21.12.2016г
подпись, дата

В.С. Шацкий

Ответственные исполнители темы:

член-корр. РАН


_____ 21.12.2016г
подпись, дата

В.С. Шацкий (раздел 1)

кандидат геолого-минералогических
наук


_____ 21.12.2016г
подпись, дата

С.И. Дриль (раздел 2)

УДК 550.42:546.027

Реферат

Отчет включает 28 стр., 19 илл., 18 ист.

Ключевые слова: плюмтектоника, изотопно-геохимические индикаторы, кимберлитовая трубка, магматические процессы, гранитообразование, изотопный состав свинца, рудные месторождения

Процессы мантийно-корового взаимодействия определяют направленность в эволюции силикатной Земли, образование и рост континентальной коры, рециклирование элементов, гетерогенность мантии.

Главной целью исследований являлось выявление изотопно-геохимических свидетельств мантийно-корового взаимодействия в различных геодинамических обстановках и определение масштабов этого процесса. В качестве эталонных объектов исследования были выбраны Сибирский кратон, консолидация архейской коры которого произошла в архейское время, и Монголо-Охотский орогенный пояс, континентальная кора которого была сфомирована в позднем палеозое – раннем мезозое.

В результате проведенных исследований ксенолитов эклогитов и перидотитов из кимберлитовой трубки Удачная Якутской алмазонасной провинции установлено несколько этапов модификации литосферной мантии, значительно разорванных во времени. Различие в составе метасоматизирующих сублитосферную мантию флюидов/расплавов предполагает их разные источники. Помимо астеносферы в качестве источника таких флюидов/расплавов могли выступать породы субдуцированной океанической коры. Установлено, что кора Сибирского кратона имеет палеоархейский возраст (>3.3 млрд лет). В ходе ряда тектонотермальных этапов (2.9-2.85, 2.75-2.72.0-1.95 млрд лет) эта кора была переработана во всех террейнах Анабарской тектонической провинции. Степень переработки варьирует в пределах отдельных террейнов. Геохимические особенности ксенолитов нижнекоровых основных гранулитов свидетельствуют о неоднократном подслаивании палеоархейской коры продуктами плюмового магматизма в течении неархея и палеопротерозоя.

Проведенные исследования показали, что метапелиты, субдуцированные на глубины, отвечающие условиям стабильности алмаза, могут быть деплетированы в разной степени, что предполагает либо их эксгумацию с разных уровней зоны субдукции, либо зависит от присутствия внешнего источника воды, которая определяет температуру растворения фенгита и образование суперкритического флюида/расплава. Определен ряд подвижности элементов в метаморфических комплексах сверхвысоких давлений: Th>Ce>La>Pr>Nd>K>Ba>Rb>Cs>Sm>Eu.

На основании интерпретации Sr-Nd изотопных данных сделан вывод о том, что вулканы шошонит-латитовой серии Монголо-Охотского орогенного пояса характеризуются умеренно обогащенным первичным изотопным составом стронция и слабоотрицательными значениями $\epsilon_{Nd}(t)$, что указывает на контаминацию родоначальных мантийных магм некоторым количеством корового вещества и, вероятно, претерпевших эпизоды предшествующего субдукционного обогащения. Изотопные составы стронция и неодима пород трахибазальтовой серии, характеризующей рифтогенный этап развития пояса, указывают на мантийный источник, который в меньшей степени был контаминирован коровым веществом.

Выяснено, что полиметаллические месторождения Аргунского террейна характеризуются гетерогенным изотопным составом рудного Pb, сформированным при участии корового источника типа «Ороген» и корово-мантийного источника. Коровый источник является преобладающим и для каждого конкретного месторождения состав его можно считать гомогенным. Вариации изотопного состава свинца пород шошонит-латитовой и трахибазальтовой серий указывают на возможное участие их вещества в рудном процессе в качестве корово-мантийного источника. Кроме этого, возможно вовлечение в позднемезозойский рудный процесс вещества палеозойских мантийных пород, присутствующих в составе террейнов.

Содержание	
Введение	5
Основная часть	7
Раздел 1. Изучение ксенолитов нижнекоровых гранулитов и эклогитов из кимберлитов, включающее исследование редкоэлементного состава минералов, а также определение возраста и изотопного состава гафния цирконов методом ИСП-МС с лазерной абляцией	7
1.1. Геохимия ксенолитов гранулитов	7
1.2. Геохимия ксенолитов эклогитов	9
1.3. Геохимия ксенолитов ультраосновных пород	12
1.4. Датирование нижнекоровых ксенолитов из кимберлитовой трубки Ботуобинская	15
Раздел 2. Исследование изотопного состава Sr и Nd в магматических породах шошонит-латитовой серии Восточного Забайкалья для выяснения природы источников магм повышенной щелочности Монголо-Охотского орогенного пояса	21
Заключение	23
Список использованных источников	25
Приложение 1. Количество статей, опубликованных по тематике проекта в течение 2013-2016 гг. в соответствии с государственным заданием.	27
Приложение 2. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2016 г. в соответствии с государственным заданием.	28

Введение

Настоящий отчет является заключительным по теме: Свидетельства мантийно-корового взаимодействия и рециклирования элементов, по которой были представлены отчеты по этапам 2013, 2014, 2015 годов.

Главной целью проекта являлось выявление изотопно-геохимических свидетельств мантийно-корового взаимодействия в различных геодинамических обстановках и определение масштабов этого процесса. В соответствии с заявленной общей целью работ поэтапно проводились следующие исследования.

На этапе 2013г работы включали в себя: 1) геохронологические (уран-свинцовая система в цирконах и изотопный состав гафния в цирконах) исследования нижнекоровых ксенолитов из кимберлитовых трубок Удачная, Ленинградская и Комсомольская (Сибирский кратон), а также геохимических особенностей алмазоносных высокоглиноземистых пород участка Барчинский (Кокчетавский массив); 2) определение подвижности элементов в зонах субдукции и состава отделяющихся от субдуцируемой плиты растворов/расплавов по результатам изучения изотопно-геохимических особенностей пород из метаморфических комплексов высоких (Муйская глыба, Максютковский комплекс, Южный Урал) и сверхвысоких давлений (Кокчетавский массив) и 3) выяснение изотопно - геохимических характеристик и реконструкция источников вещества мезозойских внутриплитовых магматических образований трахибазальтовой серий Монголо-Охотского складчатого пояса (МОП), возникших в результате воздействия на литосферу фанерозойского Центрально-Азиатского суперплюма.

На этапе 2014г. работы были направлены на решение следующих задач: 1) определение U-Pb возраста цирконов и изотопного состава гафния для выяснения этапности и продолжительности корообразующих процессов в пределах Сибирского кратона на основе исследования нижнекоровых ксенолитов из кимберлитовых трубок Юбилейная (Алакит-Мархинское поле) и Ботубинская (Накынское поле) Якутской алмазоносной провинции; 2) определение изотопно - геохимических характеристик и реконструкция источников вещества мезозойских внутриплитовых гранитоидов амуджикано-сретенского комплекса Восточного Забайкалья.

В 2015 г. планировалось: 1) определение ряда подвижности элементов при метаморфизме в зоне субдукции и моделирование состава флюидов-расплавов, отделяющихся от протолитов мантийных эклогитов; 2) реконструкция природы источника

вещества руд и генетически связанных с ними магматитов шошонит-латитовой и трахибазальтовой серий Восточного Забайкалья на основе данных об изотопном составе Pb.

В 2016 году планировалось: 1) изучение ксенолитов нижнекоровых гранулитов и эклогитов из кимберлитов, включающее исследование редкоэлементного состава минералов, а также определение возраста и изотопного состава гафния цирконов методом ИСП-МС с лазерной абляцией; 2) исследование изотопного состава Sr и Nd в магматических породах шошонит-латитовой серии Восточного Забайкалья для выяснения природы источников магм повышенной щелочности Монголо-Охотского орогенного пояса.

Основная часть отчета

Согласно плану работ 2016г. проведено исследование ксенолитов мафических и фельзических гранулитов и эклогитов из кимберлитов Якутской алмазонасной провинции, а также магматических пород шошонит-латитовой серии Александрово-Заводской впадины Восточного Забайкалья.

Раздел 1. Изучение ксенолитов нижнекоровых гранулитов и эклогитов из кимберлитов, включающее исследование редкоэлементного состава минералов, а также определение возраста и изотопного состава гафния цирконов методом ИСП-МС с лазерной абляцией

1.1. Геохимия ксенолитов гранулитов

На мультиэлементной диаграмме с использованием наименее подвижных элементов спектры распределения для мафических ксенолитов ложатся между кривыми распределения базальтов типа E-MORB и OIB как показано на Рис. 1. Наиболее близким к OIB спектром характеризуется образец *Ud-77-02*. Образцы *01-49* и *113-02* имеют характер распределения некогерентных элементов, близкий к базальтам островных дуг. Они характеризуются отрицательными аномалиями по Ti, Zr, Hf, Nb, Ta.

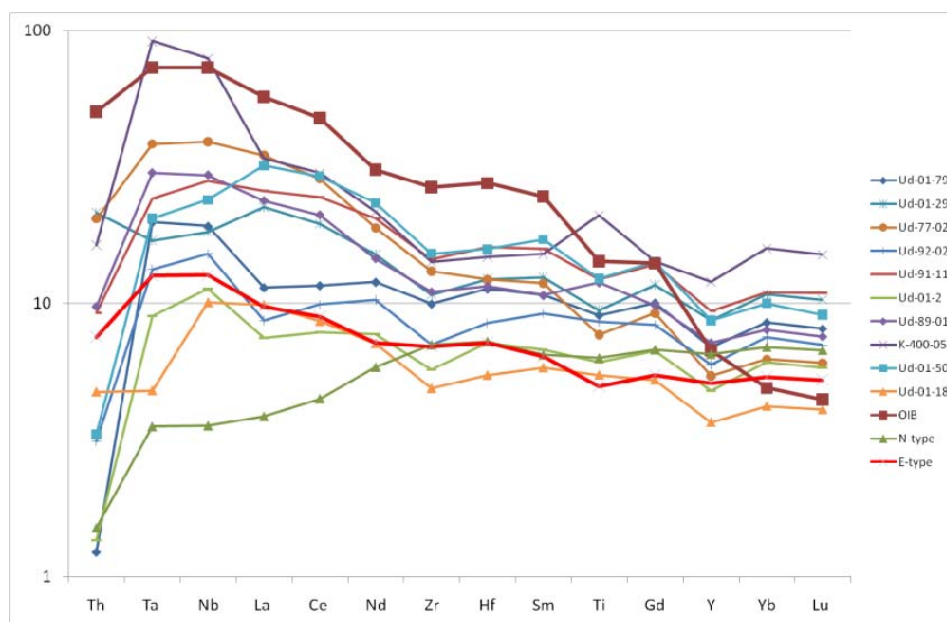


Рисунок 1. Мультиэлементные спектры распределения несовместимых элементов для ксенолитов мафических гранулитов из кимберлитовой трубки Удачная, нормированные на состав примитивной мантии.

Двупироксеновые гранулиты среднего состава *Ud-23-02* и *Ud-22-02* (Рис. 2) имеют крутые спектры распределения РЗЭ (отношение $La_N/Sm_N 4.3-5$). Также крутой наклон

характерен для спектра амфиболита *Ud-47-04* (La_N/Sm_N (4.0) и *Ud-01-49* (La_N/Sm_N 5.7). Спектр распределения для амфиболита *Ud-04-113* имеет более пологий наклон (La_N/Sm_N -2.5).

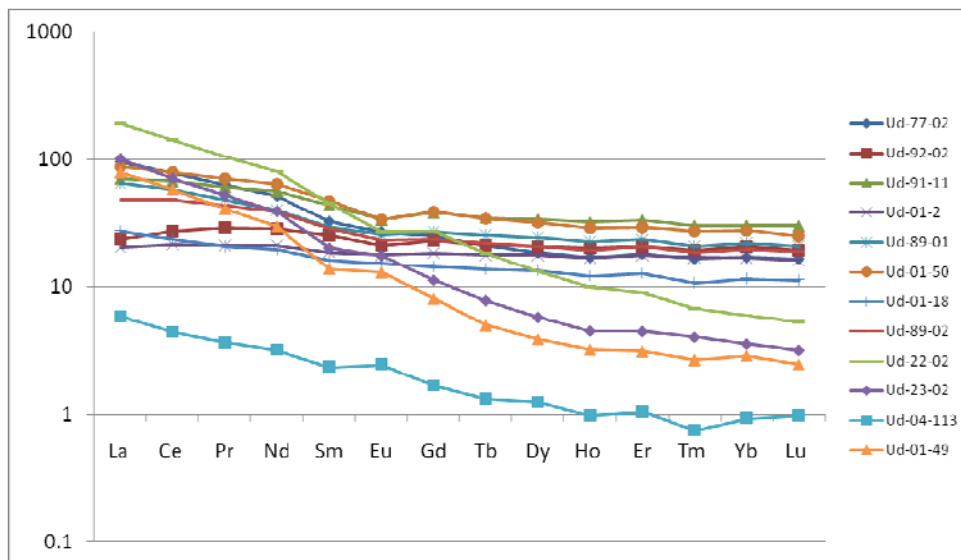


Рисунок 2. Распределение редкоземельных элементов в коровых ксенолитах кимберлитовой трубки Удачная.

На рисунке 3 показана диаграмма в координатах Nb_N – Th_N , на которой все ксенолиты, за исключением одного образца, ложатся в поля базальтов E-типа и OIB, демонстрируя различную степень обогащения плюмовым компонентом.

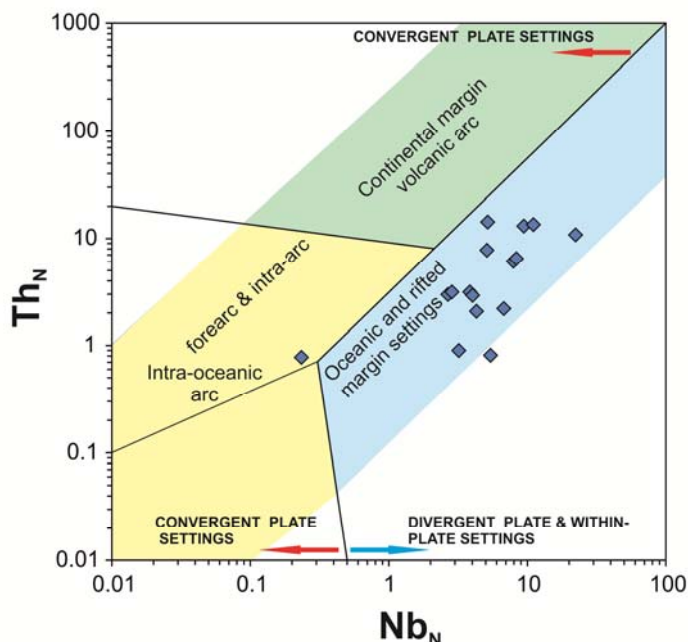


Рис. 3. Дискриминантная диаграмма в координатах Th_N – Nb_N с полями базальтов офиолитовых комплексов различных тектонических обстановок [1] и точки составов мафических гранулитов.

Ксенолит амфиболита *Ud-113-02* и ксенолиты средних (22-02, 23-02) и фельзического (*Ud-01-47*) гранулитов имеют характер распределения элементов, близкий к

островодужным базальтам, как это следует из Рисунка 4, с отрицательными аномалиями по ниобию, танталу. Образцы *Ud-22-02* и *113-02* имеют отрицательные аномалии по цирконию и гафнию.

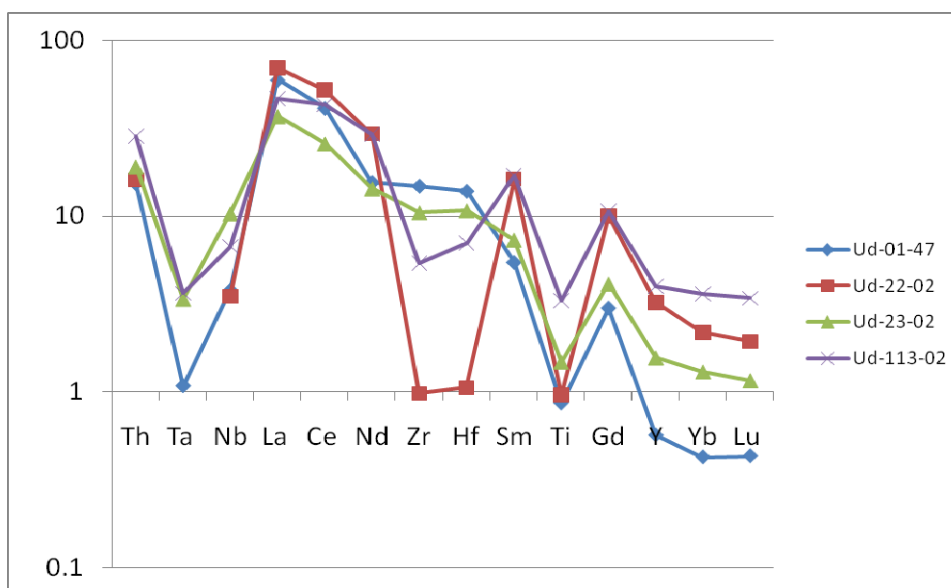


Рисунок 4. Мультиэлементная диаграмма распределения несовместимых элементов для ксенолитов с геохимическими характеристиками островодужных базальтов.

1.2. Геохимия ксенолитов эклогитов

Все эклогиты из кимберлитовой трубки Удачная, за исключением *Ud-208-02*, демонстрируют положительный наклон от эрбия до гадолиния и отрицательный от самария до лантана как это показано на Рисунке 5. Такой характер распределения может объясняться плавлением протолита эклогитов, имеющего характеристики N-MORB, в присутствии граната, и последующего обогащения легкими редкими землями в процессе метасоматоза. Эклогит *Ud-208-02* демонстрирует пологий отрицательный наклон от иттербия до лютеция.

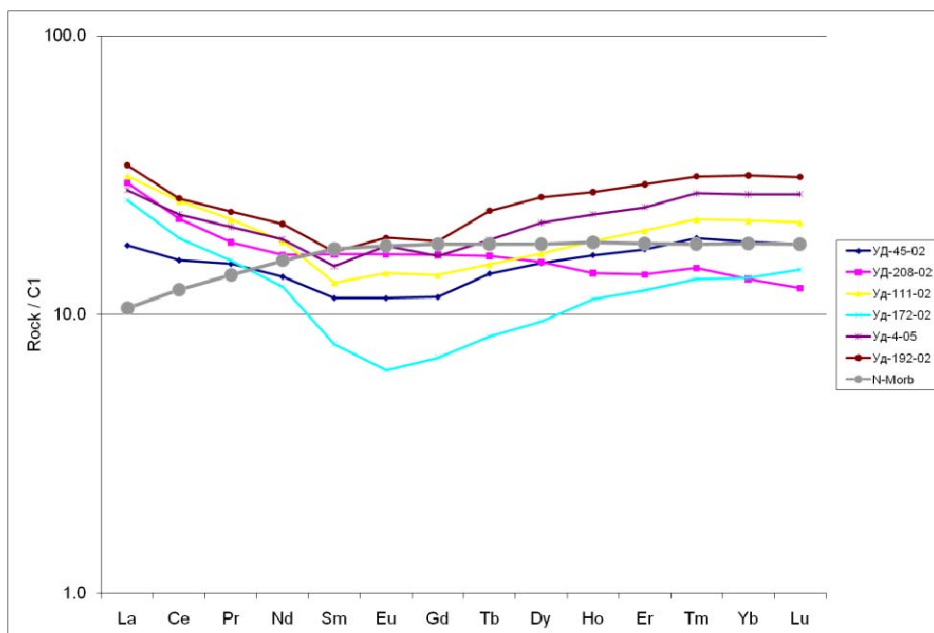


Рисунок 5. Распределение редкоземельных элементов в эклогитах из кимберлитовой трубки Удачная.

На мультиэлементной диаграмме распределения наименее подвижных элементов, показанное на Рисунке 6, эклогиты демонстрируют таковое, близкое к E типу MORB.

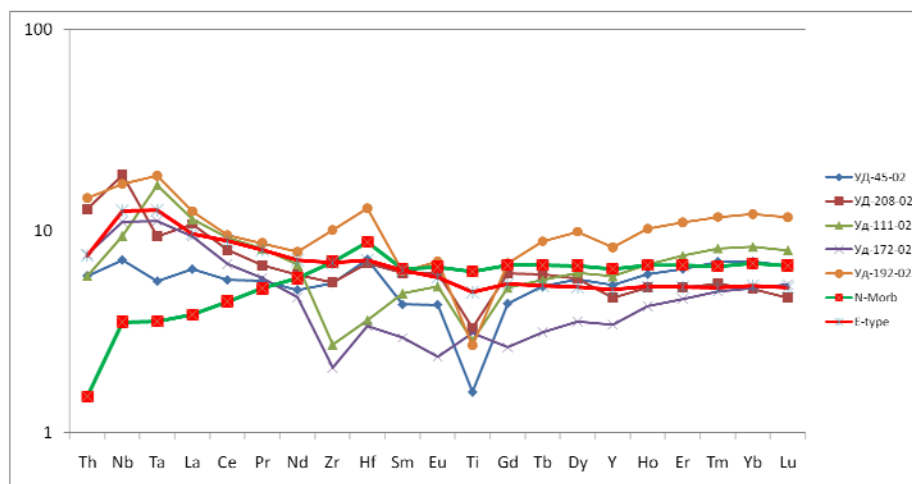


Рисунок 6. Мультиэлементная диаграмма распределения несовместимых элементов в эклогитах. Для сравнения показаны кривые распределения N-MORB и кимберлита трубки Удачной.

У пироксенов и гранатов из эклогитов методом LA-ICP-MS определены содержания редких элементов. Как видно из приведенных диаграмм, показанных на Рисунках 6 и 7, валовые мультиэлементные составы эклогитов значительно отличаются от реконструированных на основании состава пироксенов и гранатов. У реконструированных эклогитов наблюдается положительный наклон от тория до неодима.

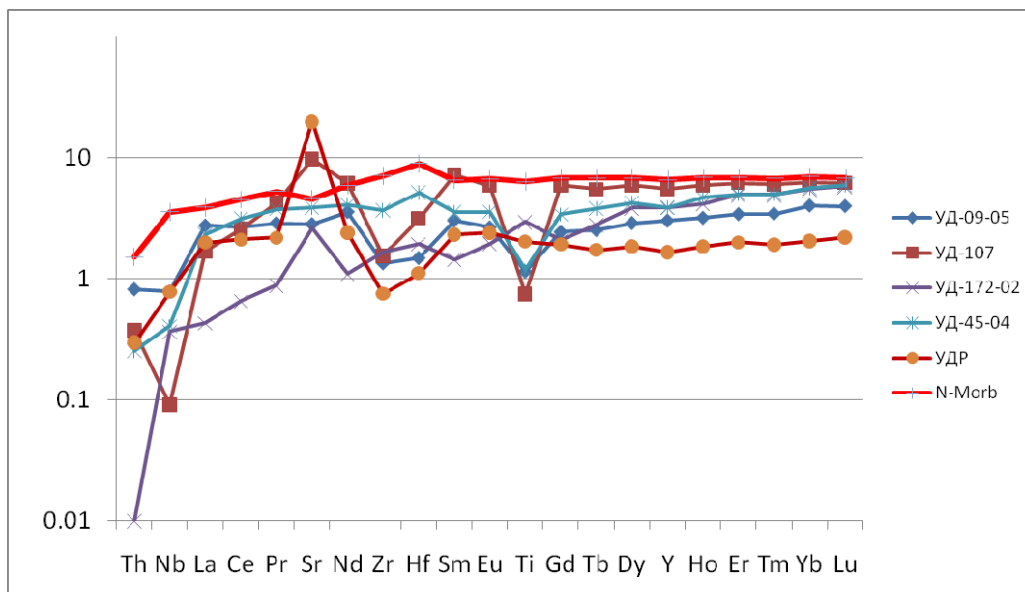


Рисунок 7. Мультиэлементная диаграмма распределения несовместимых элементов в реконструированных составах эклогитов.

Разницу в валовых и реконструированных составах обычно объясняют процессами наложенного метасоматоза [2]. Однако существует неопределенность относительно того, связан метасоматоз с кимберлитовым магматизмом или другим процессом. Исследование алмазоносных эклогитов показывают на наложенный характер алмазов [3, 4]. Включения пироксенов в алмазах обогащены легкими редкими землями, а так же Th, Nb, U, Ba относительно пироксенов матрикса. В то же время степень агрегации азота в алмазах, содержащих включения, свидетельствует о достаточно коротком промежутке времени между метасоматозом и выносом ксенолитов на поверхность (<1 млн лет). Следовательно, модификация состава эклогитов предшествовала кимберлитовому магматизму. Следует отметить, что валовые составы эклогитов имеют характер распределения некогерентных элементов, близкий к E типу MORB.

Расчет составов расплавов, равновесных с клинопироксеном эклогитов, показывает, что они заметно отличаются от кимберлитов по характеру распределения редкоземельных элементов как это показано на Рисунке 8.

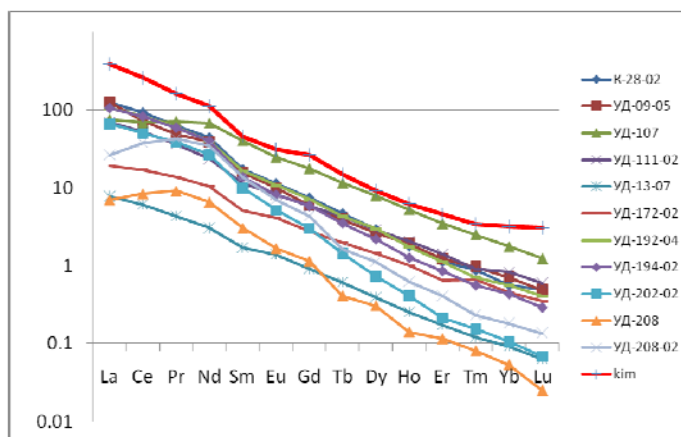


Рисунок 8. Распределение редкоземельных элементов в расплавах, равновесных с пироксенами эклогитов.

1.3. Геохимия ксенолитов ультраосновных пород

Исследование химической неоднородности в минералах ксенолитов перидотитов показало, что наиболее часто встречается химическая гетерогенность в гранате, выраженная в увеличении от центра к краю содержания титана. Проведено комплексное исследование ксенолита гранатового перидотита *Уд-11-04*, в котором ранее была выявлена наиболее сильная химическая гетерогенность в гранатах. Полученные профили распределения Cr, Ti, Fe свидетельствуют о небольшом временном интервале пребывания породы в мантии после последней стадии метасоматоза. В гранатах и клинопироксенах из этого ксенолита, а также ксенолитов *Уд-113-04*, *1-07*, *602* методом LA-ICP-MS исследован характер распределения редкоземельных элементов, который показан на Рисунке 9.

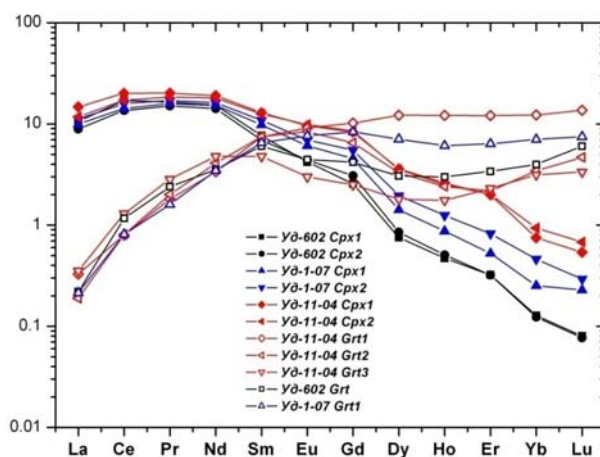


Рисунок 9. Спектры распределения РЗЭ в гранатах и клинопироксенах из ксенолитов деформированных гранатовых лерцолитов, нормированные по составу хондрита [5].

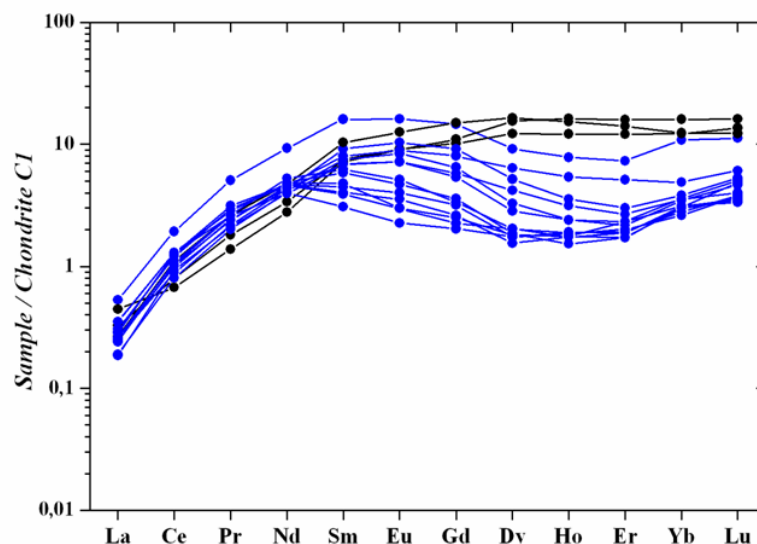


Рисунок 10. Распределение РЗЭ в гранатах из ксенолита *Uδ-11-04*. Голубым цветом показаны гранаты, содержащие больше 5% хрома.

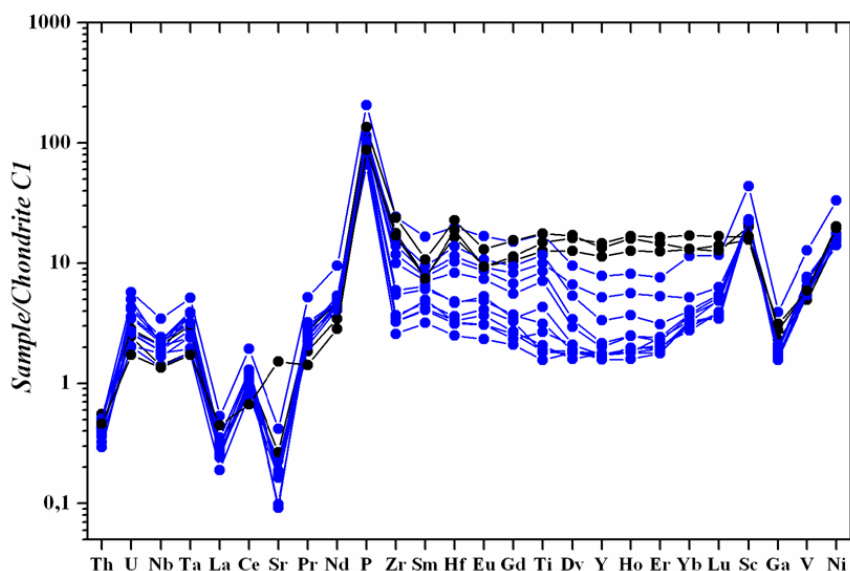


Рисунок 11. Распределение некогерентных элементов в гранатах из ксенолита *Uδ-11-04*, нормированное по составу хондрита [5]. Голубым цветом показаны гранаты, содержащие больше 5% хрома.

Полученные данные (Рис. 10, 11) показывают разный характер распределения редкоземельных элементов в гранатах с разным содержанием хрома. В образце *Uδ-11-04* гранаты с высоким содержанием хрома демонстрируют S-образное распределение редкоземельных элементов. Они обеднены тяжелыми РЗЭ по отношению к средним. Гранаты, содержание хрома в которых не превышает 5%, характеризуются ровным распределением в области тяжелых РЗЭ, на уровне десяти хондритовых единиц. Центральные части гранатов, обогащенные хромом, обеднены в сравнении с каймами Zr, Hf, Ti, Y.

На Рисунке 12 показано распределение редкоземельных элементов в гранатах, нормированных на гранат из примитивного гранатового лерцолита. Обогащенные титаном и обедненные хромом каймы гранатов имеют распределение редкоземельных элементов, близкое к гранату из примитивного гранатового лерцолита. В то же время богатые хромом центральные части зерен гранатов деплетированы относительно тяжелых и средних РЗЭ.

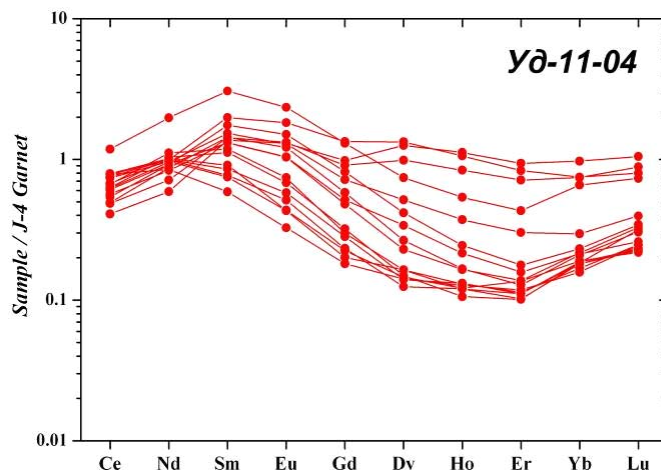


Рисунок 12. Содержание РЗЭ в ксенолите *Ud-11-04*, нормированное на гранат J-4 из примитивного гранатового лерцолита.

Расчитанные содержания редкоземельных элементов в расплавах, равновесных с центральными частями зерен и каймами, в значительной степени различаются, что следует из Рисунка 13. При расчетах использовались равновесные коэффициенты распределения гранат-расплав, рекомендованные Б. Хартом с соавторами (1996).

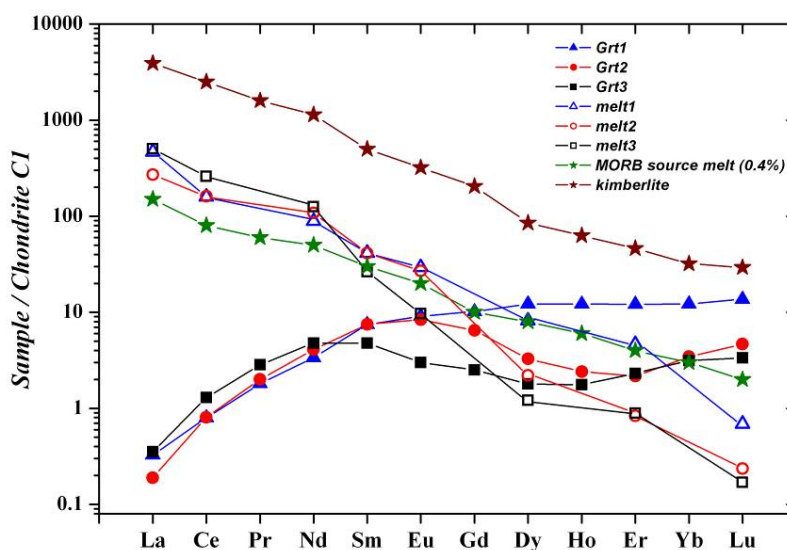


Рисунок 13. Содержания РЗЭ в расплавах, равновесных с центральными частями зерен и каймами гранатов в ксенолите *Ud-11-04*, а также в кимберлите и расплаве базальтов срединно-океанических хребтов (MORB).

Модельные расплавы, равновесные с центральными частями зерен, богатыми хромом, имеют крутые спектры распределения РЗЭ и в значительной степени деплетированы в отношении тяжелых и средних редких земель. Исходя из полученных данных, можно выделить, по крайней мере, два этапа метасоматоза. Первый этап метасоматоза связан с взаимодействием расплавов, характеризующихся сильным фракционированием РЗЭ ($La/Lu_N - 6500$) с деплетированным гранатом. Отсутствие зональности в центральных частях граната предполагает значительное время пребывания породы в мантии после этапа метасоматоза. Во время второго этапа метасоматоза нарастала кайма граната, обогащенная титаном и обедненная хромом. Распределение редкоземельных элементов в кайме близко к таковому в гранате лерцолита, имеющего примитивный валовый состав. Поэтому для этого этапа мы вправе предполагать астеносферный источник метасоматизирующего флюида. Характер зональности гранатов свидетельствует о том, что заключительный этап метасоматоза происходил незадолго до кимберлитового вулканизма.

В результате проведенных исследований установлено, что перидотиты из кимберлитовой трубки Удачная были модифицированы в ходе нескольких этапов метасоматоза, значительно разорванных во времени. Различие в составе метасоматизирующих сублитосферную мантию флюидов/расплавов предполагает их разные источники. Помимо астеносферы в качестве источника таких флюидов/расплавов могли выступать породы субдуцированной океанической коры. В пользу этого предположения свидетельствуют данные о том, что в качестве протолита эклогитов из кимберлитовых трубок Якутии выступали породы океанической коры.

1.4. Датирование нижнекоровых ксенолитов из кимберлитовой трубки Ботубинская

Из ксенолитов гранулитов среднего *Bm-7-03* (Grt+Qtz+Pl+Opx+Bt+Ap) и основного *Bm-39-03* (Grt+Pl+Qtz+Cpx+Scp) составов были выделены цирконы. Датирование цирконов U-Pb методом и определение изотопного состава гафния проводилось в геохимическом центре университета Маккуори (Австралия).

В трубке Ботубинская цирконы из ксенолита среднего гранулита *Bm-7-03* удлиненно-призматические (3.7-3:1) и округлые (1.5-1:1), размер 100-150 мкм. У ряда зерен наблюдаются идиоморфные ядра с осцилляторной зональностью и кайма без

зональности. Цирконы дают ряд конкордантных возрастов от 2942 ± 12 до 2630 ± 13 млн лет, что следует из Рисунка 14А.

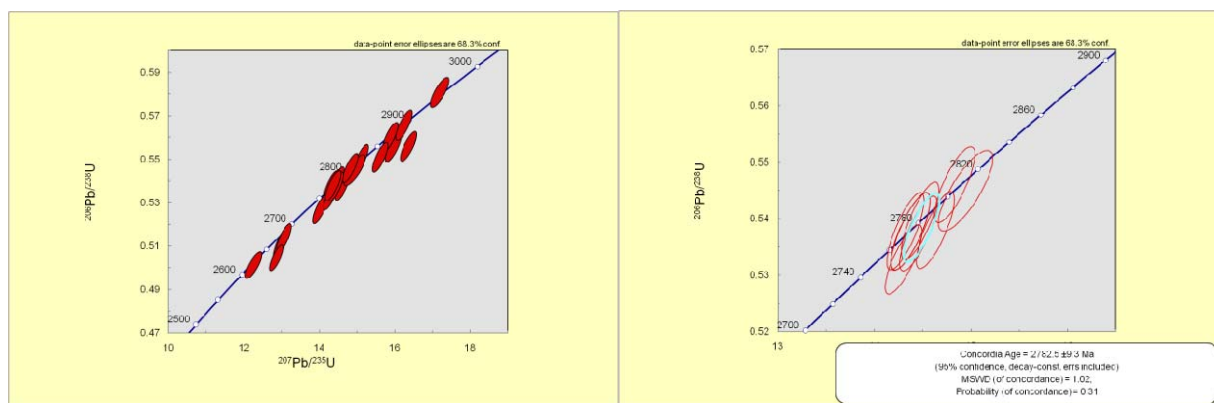


Рисунок 14 А и Б. Диаграмма с конкордией для цирконов из ксенолита среднего гранулита (*Бм-7-03*).

Зерна с наиболее древними возрастaми (2.94-2.9 млрд лет) имеют удлиненно-призматический габитус и в них отсутствует зональность. 10 зерен образуют кластер с конкордантным возрастом $2782 \pm 9,3$ млн лет, что следует из Рисунка 14 Б. На графике относительной вероятности выделяется ряд пиков (2.94, 2.87, 2.78, 2.7, 2.6 млрд лет) с наиболее сильным 2.78 млрд лет.

В ксенолите основного гранулита *Бм-39-03* преобладают цирконы округлой морфологии с отсутствием зональности или более ярко люминесцирующей центральной частью и более темной каймой. Цирконы образуют дискордию, показанную на Рисунке 15, с верхним пересечением 2750 ± 19 млн лет и нижним 2013 ± 41 млн лет.

Таким образом, у цирконов из ксенолитов трубки Ботуобинская фиксируются следующие тектонотермальные этапы: 2.94; 2.78; 2.7: 2.0 млрд лет.

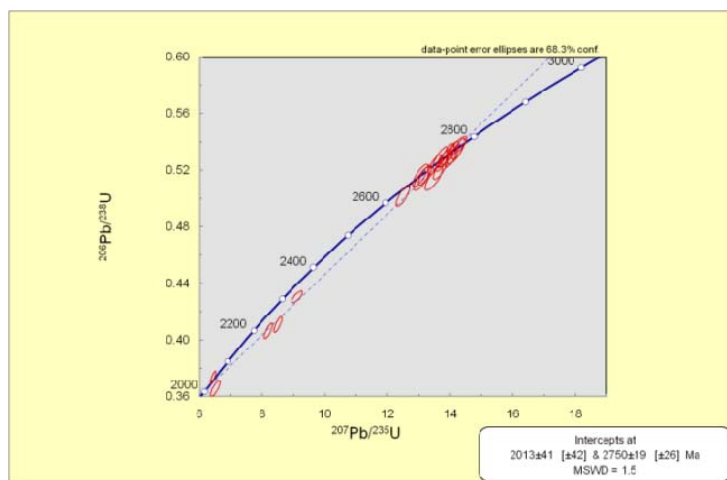


Рисунок 15. Диаграмма с конкордией для цирконов из основного гранулита *Бм-39-03*.

У цирконов из ксенолитов трубки Ботуобинская наблюдаются относительно небольшие вариации в отношениях изотопов гафния, как это показано на Рисунке 16 и Рисунке 17. В образце *Bm-39-03* от 0.280998 до 0.281106. У цирконов с возрастaми 2.7 млрд лет отношения Hf варьируют от 0.281083 до 0.280987. Величина $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ варьирует от +2.1 до -15.6. Отношение $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ от 0.000936 до 0.000070. T_{DM} от 3.07 до 2.94 млрд лет. T_{DM}^{C} от 3.12 до 3.65. Наиболее древние значения возрастa T_{DM}^{C} и низкие $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ дают цирконы с наиболее молодыми возрастaми. Цирконы с возрастaми 2.7-2.77 дают значения возрастa T_{DM} в интервале 2.94-3.07, а T_{DM}^{C} 3.12-3.31 млрд лет. Если принять возраст всех цирконов 2.75 млрд лет, то $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ варьирует от -1 до +2,4, а модельные возрастa от 3.3 до 3.08 млрд лет.

В образце *Bm-7-03* отношение изотопов гафния варьируют в интервале от 0.280939 до 0.281100. Отношение $\text{Lu}^{176}/\text{Hf}^{177}$ от 0.000735 до 0.000152. Величина $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ от +2.6 до -2. T_{DM} от 3.18 до 2.97 млрд лет. T_{DM}^{C} от 3.11 до 3.42 млрд лет.

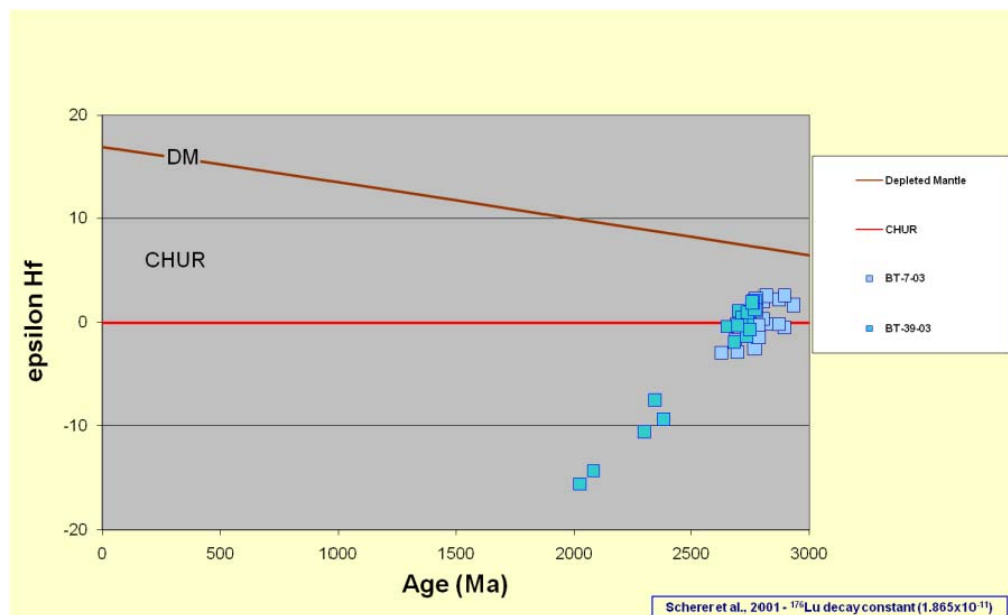


Рисунок 16. График ϵ_{Hf} – возраст для цирконов из ксенолитов трубки Ботуобинская.

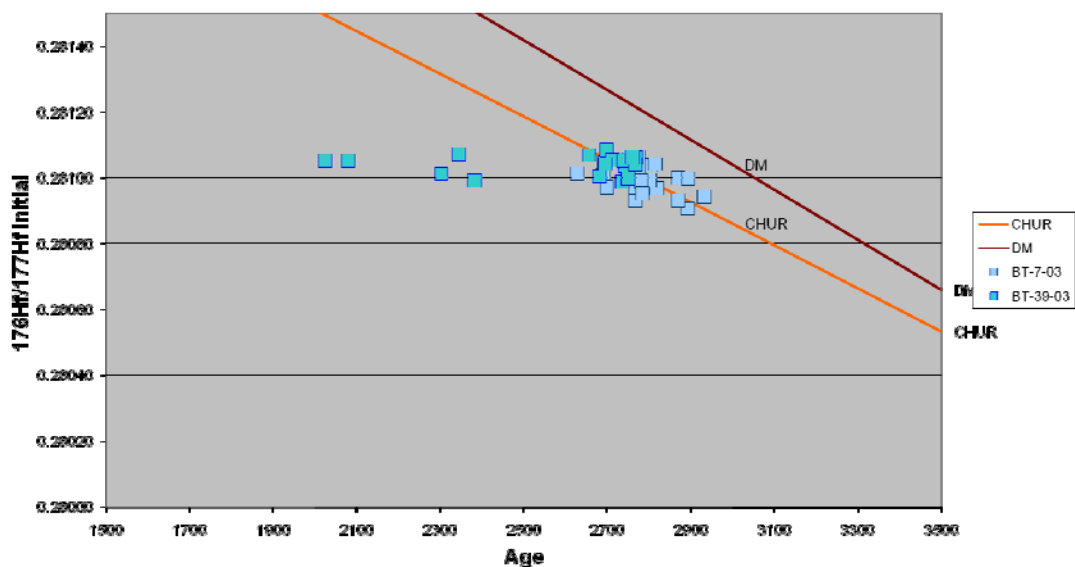


Рисунок 17. График $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{initial}}$ – возраст для цирконов из кимберлитовой трубки Ботуобинская.

Данные изучения изотопов гафния в цирконах из коровых ксенолитов свидетельствуют, что в Далдынском и Мархинском террейнах присутствовала палеорхейская кора, которая была переработана в ходе ряда тектонотермальных этапов. Все изученные нами цирконы из коровых ксенолитов кимберлитовой трубки Ботуобинская демонстрируют архейские модельные возраста (3.1-3.68 млрд лет). Относительно узкий диапазон модельных возрастов и величин $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ свидетельствует о значительно меньшей переработке коры в районах Накынского кимберлитового поля, по сравнению с корой Далдынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей [6].

Наиболее ранний тектонотермальный этап (2.9 млрд лет) зафиксированный ранее в цирконе из гранат-биотитового сланца трубки Комсомольская [6] также устанавливается в цирконах среднего гранулита из трубки Ботуобинская. Пик 2.7 млрд лет наиболее заметный и регистрирует глобальное событие на всех континентах. Он связывается с образованием неорхейского суперконтинента Кенорленд. Рядом исследователей этот пик отождествляется с периодом активного плюмового магматизма и формирования ювенильной коры [7, 8]. Однако, согласно нашим данным этот тектонотермальный этап в Анабарской тектонической провинции сопровождался, главным образом, переплавлением палеорхейской коры с небольшим привнесом ювенильного компонента. Нами не обнаружены цирконы, у которых Hf модельный возраст 2.7 млрд лет близок к возрасту кристаллизации. В ряде работ этот этап связывается с амальгамацией Сибирского кратона

[9, 10]. Однако в этом случае трудно объяснить присутствие цирконов с возрастом кристаллизации 2.7 млрд лет в ксенолитах из кимберлитовых трубок, расположенных в центральных частях террейнов. Мы можем предположить, что этап коллизии 1.98-1.9 млрд лет сопровождался плюмовым магматизмом с которым связано поступление ювенильного компонента в отдельные участки коры Сибирского кратона.

Полученные нами данные показывают, что во всех террейнах присутствует палеоархейская кора, которая была в различной степени переработана в ходе ряда тектонотермальных этапов. Это согласуется с выводами [11] о том, что в период от 3 до 1.5 млрд лет преобладали процессы переработки, а не образования ювенильной коры. Наши данные, наряду с результатами исследования детритовых цирконов, свидетельствуют о том, что на Сибирском кратоне повсеместно проявлены тектонотермальные этапы 2.9-2.85 млрд лет, 2.75-2.7 млрд лет, 2.0-1.95 млрд лет. Тот факт, что одни и те же тектонотермальные этапы проявлены в разных выделенных террейнах может свидетельствовать о том, на протяжении длительного времени (2.9-1.9 млрд лет) террейны либо входили в состав единого континента, либо находились в близкой позиции.

Таким образом, в результате проведенных исследований по этапам 2013, 2014, 2015, 2016 гг установлено, что кора Сибирского кратона имеет палеоархейский возраст (>3.3 млрд.лет). В ходе ряда тектонотермальных этапов (2.9-2.85, 2.75-2.7, 2.6-2.4 2.0-1.95 млрд лет) эта кора была переработана во всех террейнах Анабарской тектонической провинции. Степень переработки варьирует в пределах отдельных террейнов. Геохимические особенности ксенолитов нижнекоровых основных гранулитов свидетельствуют о неоднократном подслаивании палеоархейской коры продуктами плюмового магматизма в течение неархея и палеопротерозоя.

Мантийные ксенолиты также свидетельствуют о нескольких этапах модификации верхней мантии. В частности, установлено, что перидотиты из кимберлитовой трубки Удачная были модифицированы в ходе нескольких этапов метасоматоза, значительно разорванных во времени. Различие в составе метасоматизирующих сублитосферную мантию флюидов/расплавов предполагает их разные источники. В ксенолитах алмазонасных эклогитов зафиксированы процессы модификации, которые происходили незадолго до кимберлитового магматизма (<1 млн лет). Следует отметить, что валовые составы эклогитов имеют характер распределения некогерентных элементов близкий к E типу. Это может свидетельствовать либо о метасоматозе, связанном с плюмовым

магматизмом, либо о плавлении обогащенного источника, образованного в процессе субдукции океанической плиты.

Исследование обнаруженных в районе озера Барчинское в элювиальных отложениях обломков высокоглиноземистых, гранат-кианит-слюдяных сланцев и гранат-кианит-кварцевых гранофельсов, в том числе алмазоносных, позволило установить следующий ряд подвижности элементов Th>Ce>La>Pr>Nd>K>Ba>Rb>Cs>Sm>Eu.

Проведенные исследования показали, что метапелиты, субдуцированные на глубины, отвечающие условиям стабильности алмаза, могут быть деплетированы в разной степени, что предполагает либо их эксгумацию с разных уровней зоны субдукции, либо зависит от присутствия внешнего источника воды, которая определяет температуру растворения фенгита и образование суперкритического флюида/расплава.

Раздел 2. Исследование изотопного состава Sr и Nd в магматических породах шошонит-латитовой серии Восточного Забайкалья для выяснения природы источников магм повышенной щелочности Монголо-Охотского орогенного пояса

Мезозойские постаккреционные магматические комплексы центральной части Монголо-Охотского пояса представляют собой объекты, позволяющие выяснять значение различных мантийных и коровых источников вещества, вовлеченных во внутриплитовый магматический процесс, завершавший развитие этого орогенного пояса. Александрово-Заводская рифтогенная впадина Восточного Забайкалья рассматрена как эталонная структура, где на сравнительно небольшой площади проявлены магматические образования как шошонит-латитовой, так и трахибазальтовых серий, являющихся типоморфными для постаккреционной стадии развития МОП [12, 13].

Вариации величин $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(0)}$ и $1/\text{Sr}$ в породах шошонит-латитовой серии Акатуевской вулканоплутонической ассоциации (рис. 18) указывают на ключевую роль процесса фракционной кристаллизации как ведущего петрогенетического фактора. Незначительная роль коровой контаминации выражается в породах в слабой положительной корреляции между величинами $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(0)}$ и $1/\text{Sr}$. На диаграмме также показаны возможные линии смешения вещества субщелочного базальта с разными типами коровых субстратов. В качестве модельного базальта выбран состав с наименее радиогенным изотопным составом Sr из выборки [14], а в качестве коровых субстратов – валовый состав верхней континентальной коры по [15] состав гранита ундинского комплекса Восточного Забайкалья по [16].

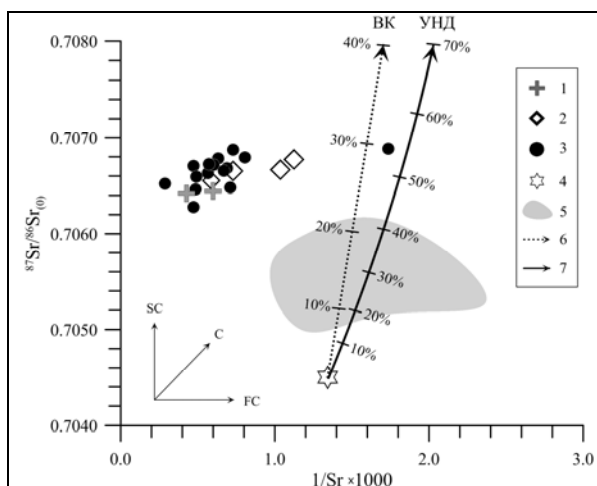


Рисунок 18. Диаграмма $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - 1/\text{Sr} \times 1000$ для пород Акатуевской вулканоплутонической ассоциации. Условные обозначения: 1 – породы ранней фазы Акатуевского массива; 2 – породы главной фазы Акатуевского массива; 3 – вулканиты нижней пачки кайласской свиты; 4 – средний состав континентального базальта Северной Азии по [17]; 5 – область составов позднеюрско-раннемеловых трахибазальтов Ингодинской и Усуглинской и Александрово-Заводской рифтогенных впадин Восточного Забайкалья по [18]; 6 – линия смешения между модельным составом базальта из выборки [14] и валового состава верхней континентальной коры (ВК) по [15]; 7 – линия смешения между модельным составом внутриплитового базальта из выборки [14] и гранитом ундинского комплекса [16]. Обозначение векторов процессов: FC – фракционной кристаллизации, C – смешения источников (коровая контаминация), SC – вариация или смена источников.

Точки составов пород на Sr-Nd изотопной диаграмме (рис.19) располагаются в ее четвертом квадранте, обладая относительно радиогенным составом Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(0)} = 0,70642-0,70688$) и слабо отрицательными величинами ϵNd ($\epsilon\text{Nd}_{(T)} = -0,6-(-2,2)$).

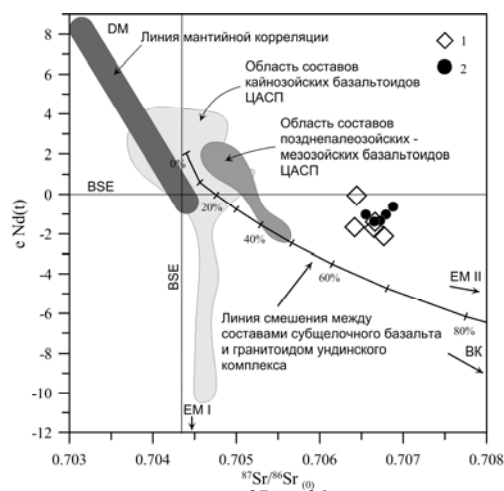


Рисунок 19. Изотопная диаграмма $\epsilon\text{Nd}(t) - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(0)}$ для пород шошонит-латитовой и трахибазальтовой серий Александрово-Заводской впадины. Условные обозначения: 1-2 – породы Акатуевской вулканоплутонической ассоциации (шошонит-латитовая серия): 1 – породы ранней и главной фаз Акатуевского массива, 2 – вулканиты нижней пачки кайласской свиты. Области составов поднепалеозойских, мезозойских, кайнозойских внутриплитовых базальтоидов Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) приведены по [17]. Линия смешения рассчитана между модельным составом внутриплитового базальта из выборки [14] и гранитом ундинского комплекса [16].

Эти характеристики свойственны магматическим образованиям, связанным своим происхождением с обогащенным источником EMII или испытавшим контаминацию веществом континентальной коры. Изотопные Sr-Nd характеристики позднепалеозойских и мезозойских базальтоидов Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) (рис.19) объясняются именно влиянием обогащенного мантийного источника EMII [17]. Сходное изменение изотопных характеристик основных расплавов будет наблюдаться и в случае низких и умеренных степеней контаминации первых коровым веществом, что иллюстрируется линией смешения между составами модельного субщелочного базальта и гранита ундинского комплекса Восточного Забайкалья, принятого в качестве регионального корового репера. Составы пород Акатуевской вулканоплутонической ассоциации заметно смещены вправо в область более радиогенного состава стронция как от тренда смешения деплетированного мантийного источника с обогащенным источником EMII, намечаемым полем составов позднепалеозойских и мезозойских базальтоидов ЦАСП, так и от тренда коровой контаминации. Это различие может быть связано с участием в составе корового контаминирующего субстрата карбонатных пород, обогащенных стронцием и обедненных неодимом.

Заключение

Важнейшие результаты работ по НИР (этапы 2013, 2014, 2015, 2016 гг) заключаются в следующем.

Основным выводом по результатам впервые проведенного датирования цирконов нижнекоровых ксенолитов Якутской алмазоносной провинции U-Pb методом и определения изотопного состава гафния методом LA-ICP-MS явилось доказательством того, что во всех террейнах Якутской алмазоносной провинции присутствует палеоархейская кора, которая была в различной степени переработана в ходе серии тектоно-термальных этапов. Это свидетельствует о том, что основной объем континентальной земной коры региона был сформирован в палеоархее. Выделенные тектоно-термальные этапы, которые проявлены на большой площади Сибирского кратона, могут объясняться влиянием плюмов, связанных с подъемами суперплюмов в периоды 2,9, 2,7 и 2 млрд лет.

Комплексное исследование ксенолитов эклогитов, в том числе и алмазоносных, а так же ксенолитов ультраосновных пород, позволило установить ряд этапов модификации литосферы Якутской алмазоносной провинции, значительно разорванных во времени.

На основании минералого-геохимических исследований обнаруженных на участке Барчинский (Кокчетавский массив) в различной степени деплтитрованных высокоглиноземистых гранофельсов и гранат-кианит- мусковитовых сланцев, показано, что породы имели единый протолит. Это позволило впервые установить ряд подвижности элементов в метаморфическом комплексе сверхвысоких давлений из палеозоны субдукции континентального типа.

На основании интерпретации Sr-Nd изотопных данных сделан вывод о том, что вулканиты шошонит-латитовой серии Монголо-Охотского орогенного пояса характеризуются умеренно обогащенным первичным изотопным составом стронция и слабоотрицательными значениями $\epsilon Nd(t)$, что указывает на контаминацию родоначальных мантийных магм некоторым количеством корового вещества и, вероятно, претерпевших эпизоды предшествующего субдукционного обогащения. Изотопные составы стронция и неодима пород трахибазальтовой серии, характеризующей рифтогенный этап, указывают на мантийный источник, который в меньшей степени был контаминирован коровым веществом.

Выяснено, что полиметаллические месторождения Аргунского террейна характеризуются гетерогенным изотопным составом рудного Pb, сформированным при

участии корового источника типа «Ороген» и корово-мантийного источника. Коровый источник является преобладающим и для каждого конкретного месторождения состав его можно считать гомогенным. Вариации изотопного состава свинца пород шошонит-латитовой и трахибазальтовой серий указывают на возможное участие их вещества в рудном процессе в качестве корово-мантийного источника. Кроме этого, возможно вовлечение в позднемезозойский рудный процесс вещества палеозойских мантийных пород, присутствующих в составе террейнов.

Кварц-золоторудные месторождения характеризуются значительными вариациями изотопного состава рудного Pb, что определяется возможным сочетанием трех источников вещества: 1) корового типа «Ороген», 2) «палеозойского» корового и 3) корово-мантийного. В качестве последнего могут выступать как породы трахибазальтовой серии, так и палеозойские мантийные породы, присутствующие в составе террейнов.

Приведенные выше выводы свидетельствуют о том, что программа НИР 2013-2016гг выполнена в полном объеме.

В процессе выполнения НИР использовались передовые методы изотопно-геохимических исследований – валовый элементный ICP-MS анализ горных пород; элементный локальный LA-ICP-MS анализ минералов; локальный U-Pb изотопный LA-ICP-MS анализ, применяемый для датирования цирконов; локальный LA-ICP-MS анализ изотопного состава Hf в цирконах; классические методы изотопного анализа Sr, Nd, Pb в породах и рудах методом термоионизационного масс-спектрометрического анализа. Выводы о этапности корообразующих процессов под Сибирским кратоном, о выяснении ряда подвижности элементов в процессах континентальной субдукции, реконструкции источников вещества постааккреционных магматических образований Монголо-Охотского пояса и связанных с ними полиметаллических и кварц-золоторудных месторождений в полной мере соответствуют лучшим достижениям в соответствующих областях знания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Saccani E, 2015. A new method of discriminating different types of post-Archeanophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematic. *Geoscience Frontiers*, 6, 281-501.
2. Pernet-Fisher, J.F., Howarth, G.F., Liu, Y., Barry, P.H., Carmody, L., Valley, J.W., Bodnar, R.J., Spetsius, Z.V., Taylor, L.A., 2014. Komsomolskaya diamondiferous eclogites: evidence for oceanic crustal protoliths. *Contrib. Mineral. Petrol.* 167, 1–17.
3. Shatsky, V., Ragozin, A., Zedgenizov, D., Mityukhin, S., 2008. Evidence for multistage evolution in a xenolith of diamond-bearing eclogite from the Udachnaya kimberlite pipe. *Lithos* 105 (3), 289–300.
4. Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л. Свидетельства присутствия субдукционного компонента в алмазоносной мантии Сибирского кратона // *Геология и геофизика*, 2016, № 1, С. 143-162
5. Sun S.-s, McDonough 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Saunders A.D., Norry M.J. (eds). *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication*, No. 42, pp 313-345.
6. Shatsky V.S., Malkovets V.G., Belousova E.A., Tretiakova I.G., Griffin W.L., Ragozin A.L., Gibsher A.A., O'Reilly S.Y. Tectonothermal evolution of the continental crust beneath the Yakutian diamondiferous province (Siberian craton): U–Pb and Hf isotopic evidence on zircons from crustal xenoliths of kimberlite pipes // *Precambrian Research*, 2016, V. 282, P. 1-20
7. Arndt, N. & Davaille, A. 2013. Episodic Earth evolution. *Tectonophysics*, 609, 661–674.
8. Reddy S.M., Evans D.A.D. 2009. Palaeoproterozoic supercontinents and global evolution: correlations from core to atmosphere. Reddy, S. M., Mazumder, R., Evans, D. A. D. & Collins, A. S.. (eds) *Palaeoproterozoic Supercontinents and Global Evolution. Geological Society, London, Special Publications*, 323, 1–26.
9. Smelov, A.P., Timofeev, V.F., 2007. The age of the North Asian Cratonic basement: an overview. *Gondwana Res.* 12, 279–288
10. Turkina, O.M., Berezhnaya, N.G., Lepekhina, E.N., Kapitonov, I.N., 2012. U–Pb (SHRIMP II), Lu–Hf isotope and trace element geochemistry of zircons from high-grade metamorphic rocks of the Irkut terrane, Sharyzhalgay uplift: implications for the Neoproterozoic evolution of the Siberian Craton. *Gondwana Res.* 21, 801–817.
11. Cawood P.A., Hawkesworth C.J., Dhuime B. 2013. The continental record and the generation of continental crust. *GSA Bulletin*, 125, 14-32.

12. Таусон Л.В., Антипин В.С., Захаров М.Н., Зубков В.С. Геохимия мезозойский латитов Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1984, 205 с.
13. Антипин В.С. Геохимическая эволюция известково-щелочного и субщелочного магматизма. Новосибирск: Наука, 1992, 223 с.
14. 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.
15. 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 Ser.1, 1977, p. 325-335.
16. Козлов В.Д., Ефремов С.В., Дриль С.И., Сандимирова Г.П. Геохимия, изотопная геохронология и генетические черты Верхнеундинского гранитоидного батолита (Восточное Забайкалье) // Геохимия, 2003, № 4, с. 408-424.
17. 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.
18. Сасим С.А., Дриль С.И. Геохимия и Sr-Nd изотопная систематика пород шошонитовой 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Количество статей, опубликованных по тематике проекта в течение 2013-2016 гг. в соответствии с государственным заданием.

индикатор	Ед. измерения	Всего за 2013-2016 гг.	2013	2014	2015	2016
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	22	3	6	8	7
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEBofScience)	единиц	22	3	6	8	7
Число тезисов в конференциях	единиц	14	6	3	3	2
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности: зарегистрированных патентов в России зарегистрированных патентов за рубежом	единиц единиц	0	0	0	0	0

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2016 г. в соответствии с государственным заданием

1. Skuzovатов S.Yu., Wang K.-L., Shatsky V.S., Buslov M.M. Geochemistry, zircon U–Pb age and Hf isotopes of the North Muya block granitoids (Central Asian Orogenic Belt): Constraints on petrogenesis and geodynamic significance of felsic magmatism // *Precambrian Research*, 2016, V. 280, P. 14-30

2. Shatsky V.S., Malkovets V.G., Belousova E.A., Tretiakova I.G., Griffin W.L., Ragozin A.L., Gibsher A.A., O'Reilly S.Y. Tectonothermal evolution of the continental crust beneath the Yakutian diamondiferous province (Siberian craton): U–Pb and Hf isotopic evidence on zircons from crustal xenoliths of kimberlite pipes // *Precambrian Research*, 2016, V. 282, P. 1-20

3. Sobolev N.V., Shatsky V.S., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Reutsky V.N. Polycrystalline diamond aggregates from the Mir kimberlite pipe, Yakutia: Evidence for mantle metasomatism // *Lithos*, 2016, V. 265, P. 257-266.

4. Полин В.Ф., Дриль С.И., Ханчук А.И., Веливецкая Т.А., Владимирова Т.А., Ильина Н.Н. Вариации изотопного состава свинца в полиформационных магматитах Кеткапско-Юнской магматической провинции Алданского щита как свидетельство мантийно-корового взаимодействия // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 468. № 5. С. 566-571.

5. Сасим С.А., Дриль С.И., Травин А.В., Владимирова Т.А., Герасимов Н.С., Носкова Ю.В. Шошонит-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.

6. Скузоватов С.Ю., Склярлов Е.В., Шацкий В.С., Ванг К.-Л., Куликова К.В., Зарубина О.В. Возраст метаморфизма и природа протолита гранулитов Южно-Муйской глыбы (Байкало-Муйский складчатый пояс) // *Геология и геофизика*, 2016, № 3, С. 575-591.

7. Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л. Свидетельства присутствия субдукционного компонента в алмазоносной мантии Сибирского кратона // *Геология и геофизика*, 2016, № 1, С. 143-162