

На правах рукописи

Румянцева Наталья Алексеевна



**ПРОБЛЕМА НАХОЖДЕНИЯ РАЗНОВОЗРАСТНОГО
ЦИРКОНА В ОКЕАНИЧЕСКИХ ПОРОДАХ ХРЕБТА ШАКА
(ЮЖНАЯ АТЛАНТИКА)**

*Специальность 1.6.4. Минералогия, кристаллография.
Геохимия, геохимические методы поисков полезных
ископаемых*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Скублов Сергей Геннадьевич

Официальные оппоненты:

Силантьев Сергей Александрович

доктор геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, лаборатория геохимии магматических и метаморфических пород, заведующий лабораторией;

Кудряшов Николай Михайлович

кандидат геолого-минералогических наук, Геологический институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», лаборатория геохронологии и геохимии изотопов, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **5 июля 2024 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.3 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, **ауд. №1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 3 мая 2024 г.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ГУЛЬБИН
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

За последние два десятилетия в породах Мирового океана продатировано значительное количество зёрен циркона различного возраста, как ожидаемо «молодого», так и более «древнего». Практически все известные в настоящий момент находки «древнего» циркона имеют отношение к Срединно-Атлантическому хребту в Южной Атлантике.

Подобные находки служат предметом научных дискуссий, которые продолжаются до сих пор. Основной поднимаемый в них вопрос – механизм перемещения «древнего» циркона в молодую океаническую кору. Вначале присутствие заведомо более древнего по возрасту, чем океанические породы, циркона пытались объяснить контаминацией при опробовании пород или в процессе сепарации минералов. Однако количество таких находок продолжало расти, как и количество аккредитованных лабораторий, в которых производилась пробоподготовка. В результате был сделан вывод, что это не артефакт, а сам циркон следует рассматривать в качестве ксеногенного, то есть унаследованного от более древних пород (Bea et al., 2020).

Диссертационное исследование направлено на установление характера распределения редких, редкоземельных элементов и изотопов (U-Pb, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) в цирконе из магматических пород хребта Шака в Южной Атлантике с целью выявления его возможных источников.

Настоящая работа вносит вклад в продолжающееся по сей день изучение процесса рециклинга древней континентальной коры.

Степень разработанности темы исследования

Район хребта Шака в Южной Атлантике до сих пор остаётся малоизученным, «белым пятном» на карте Мирового океана. Достоверной информации о становлении и природе

хребта Шака в настоящее время нет. Первые геолого-геофизические исследования в этом районе были проведены в начале 2000-х (Lin et al., 2001, 2003). Предпринимались попытки реконструкции геологических процессов формирования хребта (Hartnady, LeRoex, 1985; O'Connor et al., 2012).

Проблематике разновозрастного циркона в породах океанической коры посвящены десятки научных публикаций (Беляцкий и др., 1997; Шарков и др., 2004; Бортников и др., 2008, 2019, 2022; Костицын и др., 2009, 2015, 2018; Сколотнев и др., 2010; Аранович и др., 2013; Torsvik et al., 2013; Cheng et al., 2016; Ashwal et al., 2017; Кременецкий и др., 2018; Шулягин и др., 2019). Однако многие вопросы, касающиеся механизмов поступления циркона в породы, которые удовлетворяли бы современным представлениям о строении срединно-океанических хребтов, пока что остаются открытыми.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых по пунктам 1, 2, 3, 13, 19 и 20.

Объектом исследования являются зёрна циркона из магматических пород, слагающих хребет Шака в Южной Атлантике.

Предмет исследования – изотопно-геохимические характеристики циркона из магматических пород хребта Шака.

Цель работы – выявление возможных источников поступления ксеногенного циркона в магматические породы хребта Шака.

Задачи исследования:

1. Установление особенностей минерального, химического (по главным, редким и редкоземельным элементам) и изотопного (Sr-Nd-Pb) составов магматических пород, слагающих хребет Шака.

2. Локальное датирование циркона из магматических пород хребта Шака U-Pb методом, сопровождаемое изучением изотопного состава кислорода, характера распределения редких и редкоземельных элементов.

3. Сравнительный анализ данных по химическому составу разновозрастного циркона и вмещающих его магматических пород хребта Шака и сопоставление с данными по близлежащим объектам в Мировом океане.

Научная новизна работы:

1. Показано, что магматические породы, слагающие хребет Шака, подверглись процессу контаминации коровым материалом.

2. Впервые в габброидах хребта Шака установлен ксеногенный циркон магматического происхождения, U-Pb изотопная система которого зафиксировала возраст кристаллизации от архейских значений (2.8 млрд лет) до мезозойских (около 180 млн лет).

3. Установлено, что изотопный состав кислорода в цирконе демонстрирует разные источники его поступления в магматические породы хребта Шака и указывает на возможность преобразования под воздействием морской воды.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Проведённое исследование вносит вклад в общемировую базу данных по находкам разновозрастного циркона в породах океанической коры. Результаты и научные выводы диссертации могут быть использованы для более точной реконструкции процессов формирования молодой океанической коры и непротиворечивого объяснения присутствия в её составе древнего корового вещества; при выполнении научно-исследовательских работ по теме «Совершенствование изотопных методов датирования докембрийских комплексов и разработка новых геохимических подходов использования минералов-геохронометров», проводящихся в ФГБУН ИГГД

РАН (получен акт внедрения от 24.04.2023), а также в учебных курсах «Общая геохимия», «Изотопная геохимия» и «Петрология».

Методология и методы исследования. В основе диссертации лежит донно-каменный материал, предоставленный автору заместителем генерального директора «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», начальником отдела литологии и геохимии Б.Г. Ванштейном. Материал был получен в ходе научно-экспедиционного рейса в акватории хребта Шака на судне «Академик Фёдоров» 8 – 31 марта 2016 года в соответствии с договором 2015/28 от 25 ноября 2015 года между «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга» и ОАО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт» (ОАО «ГНИНГИ»).

В ходе научно-экспедиционного рейса было поднято порядка 696 кг донно-каменного материала. Породы имели различный состав – от осадочных алевролитов, до классических магматических толеитовых базальтов, слагающих дно Мирового океана. В основу настоящей диссертации легли представительные образцы магматических горных пород (11 образцов) базальтоидов и габброидов, которые были драгированы на северо-восточной средней части хребта Шака и в области южного подножия местного нагорья в зоне юго-западной оконечности хребта.

Детально описаны 26 петрографических шлифов. Химический состав пород по главным элементам определён классическим методом силикатного анализа «мокрая химия» на базе химико-спектральной лаборатории (ВНИИОкеангеология). Содержание редких и редкоземельных элементов в породе проанализировано методом РСФА (СПЕКТРОСКАН-МАКС GF 1(2) E, ВНИИОкеангеология) и методом ICP-MS (ELAN-DRC-6100, ВСЕГЕИ) по стандартным методикам (33 анализа). Изотопный анализ пород проводился методом

ID-TIMS – изотопный состав Pb определялся на мультиколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT 261, изотопный анализ Rb, Sr, Sm и Nd исследовался на мультиколлекторном масс-спектрометре TRITON в статическом режиме в ИГГД РАН (5 проб). Состав породообразующих минералов (клинопироксена, плагиоклаза, а также калиевого полевого шпата из гранофировых сростаний с кварцем) анализировался методом SEM-EDS на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510LA с энерго-дисперсионной приставкой JED-2200 (112 точек). Анализ минералов (циркона, моноклинного пироксена) на содержание редких и редкоземельных элементов (105 точек) выполнен методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в ЯФ ФТИАН РАН. Локальное датирование циркона U-Pb методом проведено на ионном микрозонде SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (68 анализов, 4 пробы). Изотопный состав кислорода в цирконе определен в Институте геологии и геофизики Китайской академии наук на ионном микрозонде Cameca IMS-1280 (68 анализов, 4 пробы).

Положения, выносимые на защиту:

1. Магматические породы хребта Шака по данным минералого-геохимических исследований относятся к толеитовой серии и формировались из расплавов, испытавших контаминацию материалом континентальной коры.

2. В габброидах хребта Шака впервые установлен разновозрастный ксеногенный циркон, поступивший из древней континентальной коры, U-Pb изотопная система которого зафиксировала возраст кристаллизации от архейских значений (2.8 млрд лет) до мезозойских (180 млн лет).

3. Ксеногенный циркон имеет признаки магматического происхождения и разные материнские источники: в одних образцах он сохраняет мантийные изотопные метки кислорода, в других – демонстрирует особенности состава,

указывающие на его поступление из древней континентальной коры; часть зёрен циркона обнаруживает признаки гидротермального преобразования.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена представительностью донно-каменного материала; использованием полученных в аккредитованных лабораториях аналитических данных; применением современных технологий их обработки и интерпретации.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XXXI-XXXIV Молодёжная научная школа-конференция, посвящённая памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» (г. Санкт-Петербург, октябрь 2020; г. Петрозаводск, октябрь 2021; г. Апатиты, октябрь 2022; г. Санкт-Петербург, октябрь 2023); Geological International Student Summit (г. Санкт-Петербург, март 2021); Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 90-летию ИГЕМ РАН «Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований» (г. Москва, апрель 2021); XI Российская молодёжная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования» (г. Москва, ноябрь-декабрь 2021); XXIV Международная научная конференция (Школа) по морской геологии (г. Москва, ноябрь 2022); XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, май 2022); VIII Российская конференция по изотопной геохронологии «Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов» (г. Санкт-Петербург, июнь 2022); VIII Всероссийский молодёжный научный форум «Наука будущего – наука молодых» (г. Орёл, сентябрь 2023); Годичное собрание Российского мине-

ралогического общества и Фёдоровская сессия 2023 (г. Санкт-Петербург, октябрь 2023).

Личный вклад: автором проанализированы научные публикации, описывающие находки ксеногенного циркона в породах океанической коры в близлежащих регионах Мирового океана и предполагаемые механизмы их перемещения. Выполнена петрографическая диагностика вмещающих горных пород. Проинтерпретированы изотопно-геохимические данные для пород, слагающих хребет Шака, обоснован привнос корового материала в очаг их плавления. Проанализирован минеральный состав моноклинного пироксена и рассчитаны Р-Т параметры его кристаллизации. Проведена интерпретация изотопно-геохимических данных по составу циркона, в результате которой выявлено его магматическое происхождение и возможные источники поступления в породы хребта Шака.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 15 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (далее – перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка, состоящего из 147 наименований, списка иллюстративного материала и приложений. Работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков, 6 таблиц и 5 приложений.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему рабочему руководителю к.г.-м.н. Б.Г. Ванштейну (ВНИИОкеангеология) за содействие и предоставленный каменный материал, без которого эта работа не состоялась бы. Автор искренне признателен своему научному руководителю д.г.-м.н. С.Г. Скублову за всестороннюю поддержку, чуткое руководство и проявленное терпение. Автор благодарит А.В. Березина и В.М. Саватенкова (ИГГД РАН) за ценные советы, обсуждение результатов и помощь в ходе выполнения исследования. Большую признательность автор выражает за проведение аналитических работ В.А. Богину, Н.Л. Лунёвой, В.А. Серебряному (ВНИИОкеангеология), Е.С. Богомолу, О.Л. Галанкиной (ИГГД РАН), В.Л. Кудряшову (ВСЕГЕИ), С.Г. Симакину, Е.В. Потапову (ЯФ ФТИАН РАН), Ч.-Л. Ли, С.-Х. Ли (IGG CAS). Автор выражает благодарность своему соавтору Д.И. Резвухину (ИГМ СО РАН). Автор признателен всему коллективу кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии Горного университета за полученные знания, консультации и напутствия в процессе работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, изложены основные защищаемые положения.

В первой главе охарактеризовано состояние проблемы присутствия древнего ксеногенного циркона в породах молодой океанической коры, обсуждаются предполагаемые механизмы его перемещения.

Во второй главе приведена краткая геологическая характеристика региона исследования и история его изучения.

В третьей главе описаны использованные в исследованиях аналитические методы.

В четвёртой главе приведено петрографическое описание пород, их изотопно-геохимическая характеристика, ре-

зультаты исследования состава моноклинного пироксена, выполнена оценка P-T параметров кристаллизации габброидов.

В пятой главе даны изотопно-геохимическая и геохронологическая характеристики циркона из магматических пород хребта Шака.

Заключение отражает обобщённые выводы по результатам исследования.

Краткая характеристика объекта исследования

Территория исследования располагается в пределах акватории хребта Шака, достоверных научных заключений о происхождении и становлении которого в настоящее время нет.

Хребет Шака находится в районе западной оконечности Юго-Западного Индийского хребта (Рисунок 1). По современным представлениям Юго-Западный Индийский хребет является ультрамедленным срединно-океаническим хребтом со скоростью спрединга 14 – 18 мм/год и протягивается на 7700 км от тройного сочленения Буве в Южной Атлантике до тройного сочленения Родригез в центральной части Индийского океана.

Сам хребет Шака представляет собой протяжённую возвышенность морского дна. Более чем на 1000м он возвышается над окружающими абиссальными равнинами. Согласно результатам батиметрической съёмки, между хребтом Шака и островом Буве имеется морфологическая взаимосвязь. Стоит отметить, что, учитывая отрицательную аномалию (-50 мГал) Буве, в акватории хребта Шака предполагается более мощная кора и иной состав слагающих пород по сравнению с окружающей океанической корой, сложенной типичными для неё базальтами N-MORB (Lin et al., 2003).

Район исследований имеет сложную историю становления и развития. Главной особенностью Южной Атлантики является наличие фрагментов древней континентальной коры среди новообразованной океанической (Сушевская и др, 2003; Liu et al., 2022). Эти фрагменты не были затронуты процессами

спрединга и остались в виде мелких частей Гондваны после её распада. Впоследствии, они вовлекались в процессы плавления, в результате чего формировались магмы, имеющие метки древней континентальной коры.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Магматические породы хребта Шака по данным минералого-геохимических исследований относятся к толеитовой серии и формировались из расплавов, испытавших контаминацию материалом континентальной коры.

Исследуемые породы согласно TAS-диаграмме (Рисунок 2) в большинстве своём относятся к группе основных-средних пород низкой щёлочности ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3.12 - 5.42$ мас. %). Для оценки щёлочности пород применялось отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$: основные породы имеют диапазон значений от 1.77 до 2.34, что свидетельствует об их принадлежности к калиево-натриевому типу; у средних пород значения варьируют от 1.71 до 4.53, что характеризует калиево-натриевый и натриевый типы. Магнезиальность пород варьирует в диапазоне от 0.17 до 0.45. По глинозёмистости наблюдается отчётливое разделение между семействами пород: габброиды, как правило, умеренно-глинозёмистые ($\text{Al}' = 0.64 - 0.99$), а базальтоиды – высокоглинозёмистые (1.25 – 2.18).

Классификация магматической серии производилась при помощи нескольких диаграмм как по содержанию петрогенных, так и редких элементов. На тройной диаграмме AFM фигуративные точки тяготеют к разделительной линии между толеитовой и известково-щелочной сериями, однако, большинство точек относится к толеитовой серии (Рисунок 3) и примерно повторяют феннеровский тренд, указывающий на обогащение железом более поздних пород. По содержаниям редких элементов применялась диаграмма Zr–Y (Рисунок 4),

поскольку эти элементы более устойчивы в процессах изменения и контаминации пород, являясь индикаторами характеристик мантийного источника. Для наглядности на диаграмму были дополнительно нанесены составы базальтоидов и габброидов Южной Атлантики из базы данных PetDB. Фигуративные точки исследуемых магматитов образуют тренд в области толеитовой и переходной между толеитовой и известково-щелочной сериями и совпадают с полем базальтоидов и габброидов Южной Атлантики.

На мультиэлементных спайдер-диаграммах (Рисунок 5), нормированных к примитивной мантии, для изученных образцов примечательной особенностью являются повышенные концентрации крупноионных литофильных (Ba, Rb, Pb) относительно высокозарядных (Nb, Ta) элементов. Габброиды демонстрируют более обогащённый состав по сравнению с базальтоидами, однако, характер спектров распределения у них однотипный. Отмечается схожесть спектров для исследуемых образцов со спектрами для средних значений состава континентальной коры и терригенных осадков (GLOSS-II) (Рисунок 5).

Чувствительным индикатором процессов контаминации магматических пород веществом континентальной коры являются отношения таких несовместимых элементов как Ce/Pb и Nb/U, поскольку фракционирование элементов внутри этих пар при частичном плавлении незначительно. Исследуемые образцы характеризуются низкими отношениями Ce/Pb (1.32 – 6.95) и Nb/U (2.55 – 8.96), в то время как для современных океанических базальтов (MORB и OIB) эти значения составляют Ce/Pb – 25 ± 5 и Nb/U – 47 ± 10 (Hofmann et al., 1986) и близки к аналогичным отношениям в терригенных осадках (Ce/Pb – 2.72 и Nb/U – 5.44) (Plank, 2014) или в континентальной коре (Ce/Pb – 3.90 и Nb/U – 6.20) (Rudnick, Gao, 2003), что

указывает на контаминацию магматических пород хребта Шака материалом континентальной коры.

По изотопным данным в исследуемых образцах отмечаются высокие отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7043 – 0.7130), низкие – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.5124 – 0.5129) и умеренные – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (18.306 – 19.318), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15.584 – 15.667), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (37.995 – 38.842). Сильные вариации в изотопном составе $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7043 – 0.7130), вероятно, вызваны воздействием морской воды на породы (Alt, Teagle, 2000). Анализ изотопных отношений показал, что исследуемые образцы близки по их значениям к мантийному резервуару типа EM-II и области терригенных осадков GLOSS-II, но при этом остаются в области N-MORB Южной Атлантики (Рисунок 6). Для уточнения был проведён расчёт по методу главных компонент, по методике, приведённой в (Dong et al., 2021), где в качестве основы использовались данные по изотопному составу свинца для деплетированной мантии (DMM, источника N-MORB), верхней континентальной коры (UCC) и обогащённой мантии типов EM-I и EM-II. При помощи данного метода можно спроецировать трёхмерный мантийный тетраэдр (врезка на Рисунке 7) на плоскость. Анализ показал, что обогащённая мантия EM-II не оказывает влияния, а фигуративные точки, отвечающие изотопному составу магматических пород хребта Шака, отчётливо выстраиваются в тренд от деплетированной мантии до верхней континентальной коры (Рисунок 7), свидетельствуя о смешении этих двух источников.

При исследовании минерального состава пород хребта Шака особый интерес вызывает моноклинный пироксен, поскольку для данного типа пород он является основной минеральной фазой. Согласно классификации пироксенов по (Morimoto et al., 1988), исследованные зёрна этого минерала принадлежат Ca-Mg-Fe типу и представлены авгитом или пижонитом. Присутствие пижонита свидетельствует о высокой

температуре ($>900^{\circ}\text{C}$) и быстром остывании расплава, что позволяет отнести изученные породы к толеитовой серии, индикатором которой он является (Borghese et al., 2023; Jahns, Kudo, 2023). Расчёт давлений на основе химического состава клинопироксена по (Wang et al., 2021) свидетельствует о том, что в ходе его кристаллизации давление не превышало 3 кбар.

2. В габброидах хребта Шака впервые установлен разновозрастный ксеногенный циркон, поступивший из древней континентальной коры, U-Pb изотопная система которого зафиксировала возраст кристаллизации от архейских значений (2.8 млрд лет) до мезозойских (180 млн лет).

С целью установления особенностей распределения главных, редких и редкоземельных элементов в цирконе и оценки условий его кристаллизации было проанализировано 156 зёрен, выделенных из 4 проб (3 из которых габброиды, 1 – толеитовый базальт).

Исследуемым зёрнам циркона свойственны изометричные или удлинённые формы. В режиме катодолюминесценции они имеют в основном тёмную окраску, но присутствуют и единичные светлые зёрна (Рисунок 8). Во многих из них можно наблюдать сложное внутреннее строение, выраженное осцилляционной зональностью (например, зёрна 2 и 3 из обр. 3-2-11 на Рисунке 8), которая является отражением неравновесных условий во время кристаллизации циркона и маркером его магматического происхождения (Cavoise et al., 2009; Piilonen et al., 2018).

U-Pb изотопная система зафиксировала довольно широкий диапазон возрастных значений. Так, циркон из обр. 3-1-1 образует конкордантный кластер с возрастом около 180 млн лет (Рисунок 9). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст циркона из обр. 3-2-11 варьирует от 490 до 610 млн лет с преобладанием значений около 520 – 550 млн лет. Циркон из обр. 3-2-23 демонстрирует наибольший

разброс возрастных значений, в основном от 500 млн лет до 1.1 млрд лет. При этом наблюдаются единичные значения палеопротерозойского и архейского возрастов. Циркон из обр. 3-2-55 образует дискордию с возрастом верхнего пересечения с конкордией около 2.8 млрд лет, нижнего пересечения – около 590 млн лет. Возраст верхнего пересечения рассматривается как время магматической кристаллизации циркона, а нижнего пересечения – как время наложенного термального события (например, метаморфизма). Все полученные возрастные значения превышают возраст океанической коры в районе хребта Шака 35 – 53 млн лет (Fisher, Sclater, 1982; Sauter, Cannat, 2010); соответственно, по отношению к вмещающим породам этот циркон является ксеногенным, т.е. унаследованным от более древних пород.

Для выявления условий кристаллизации циркона была использована дискриминационная диаграмма, предложенная К. Граймсом (Grimes et al., 2007) (Рисунок 10) и основанная на значениях содержания Y и отношения U/Yb. Помимо авторских данных, на диаграмму были вынесены данные по «молодому» циркону из подводной горы Атлантис (Xu et al., 2021), который однозначно кристаллизовался в условиях океанической коры. На диаграмме все исследуемые зёрна циркона из хребта Шака расположились в фигуративном поле континентальной коры, отчётливо отделившись от «молодого» циркона океанического происхождения, что отражает существенную разницу в их редкоэлементном составе.

Ещё одним эффективным критерием для выявления происхождения циркона выступает содержание Li (Ushikubo et al., 2008; Bouvier et al., 2012). Циркон, который кристаллизовался в океанической коре, характеризуется экстремально низким содержанием Li – не более 0.05 ppm, тогда как в цирконе, кристаллизовавшемся в континентальной коре, как правило, содержание Li укладывается в интервал 1 – 100 ppm

(Рисунок 11) (Ushikubo et al., 2008; Grimes et al., 2011; Bouvier et al., 2012). В рассматриваемом цирконе из обр. 3-1-1 содержание Li варьирует от 0.22 до 3.77 ppm, в цирконе из обр. 3-2-11 – от 0.42 до 113 ppm, в цирконе из обр. 3-2-23 – от 0.24 до 31.9 ppm. В цирконе из обр. 3-2-55 – в пределах 1.8 – 50 ppm. Для всех четырёх образцов уровень содержания Li в разной степени указывает на то, что исследуемой циркон связан с породами континентальной коры.

3. Ксеногенный циркон имеет признаки магматического происхождения и разные материнские источники: в одних образцах он сохраняет мантийные изотопные метки кислорода, в других – демонстрирует особенности состава, указывающие на его поступление из древней континентальной коры; часть зёрен циркона обнаруживает признаки гидротермального преобразования.

Большинство зёрен циркона имеют высокое Th/U отношение, в среднем оно составляет от 0.59 до 19.4, с единичными значениями <0.03. Спектры распределения REE, нормированные на хондрит CI, обладают дифференцированным характером с преобладанием тяжёлых редкоземельных элементов над лёгкими (Рисунок 12). Ярко выражены положительные Ce- и отрицательные Eu-аномалии. Вышеперечисленные особенности являются признаками циркона магматического происхождения (Hoskin, Schaltegger, 2003).

Изотопный состав кислорода в цирконе является надёжным маркером мантийного или корового происхождения магматических пород. Так, для циркона из обр. 3-1-1 изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$, SMOW) изменяется от 5.09 до 5.74‰ при среднем значении 5.47‰. Данное значение близко к мантийным меткам (~5.30 ‰) для циркона из габбро и серпентинитов океанической коры (Cavoise et al., 2009). Для циркона из обр. 3-2-11 значение $\delta^{18}\text{O}$ выше и варьирует в большем диапазоне (от 6.50 до 7.84‰) при среднем значении 7.02‰, заметно

превышая мантийные значения и соответствуя диапазону коровых пород (Valley, 1998). Изотопный состав кислорода циркона из обр. 3-2-23 наиболее неоднозначен и вариабелен. Величина $\delta^{18}\text{O}$ изменяется от совсем низких значений 1.13 до высоких 10.5‰, при среднем значении 7.20‰. Видимой закономерности такого распределения не наблюдается. Для циркона из обр. 3-2-55 отмечается в целом пониженная величина $\delta^{18}\text{O}$, которая изменяется от 1.75 до 3.15‰ при среднем значении 2.71‰. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в интервале 0 – 6‰ характерны для минералов пород, относящихся к нижнему слою океанической коры, сложенному габбро (например, Eiler, 2001). Гидротермальные изменения ($> 300^\circ\text{C}$) под воздействием морской воды приводят к понижению величины $\delta^{18}\text{O}$ в минералах из пород этого слоя (включая циркон) относительно мантийных значений (Gregory, Taylor, 1981; Hart et al., 1999; Eiler, 2001; Bindeman, 2008; Korolev et al., 2018). Напротив, неизменённый под воздействием морской воды циркон из океанических плагиогранитов и габбро в районе Срединно-Атлантического и Юго-Западного Индийского хребтов характеризуется достаточно узким интервалом $\delta^{18}\text{O}$ со средним значением $5.20 \pm 0.5\text{‰}$ (Grimes et al., 2011).

Фигуративные точки, отвечающие составам изученных ксенокристов циркона, были вынесены на дискриминационную диаграмму в координатах значений U-Pb возраста и величины $\delta^{18}\text{O}$ (Рисунок 13). Циркон из обр. 3-1-1 имеет узкие диапазоны значений возраста и $\delta^{18}\text{O}$, вследствие чего он образует компактное поле в мантийной области (MORB на Рисунке 13). Фигуративные точки для циркона из обр. 3-2-11 расположились в поле древней континентальной коры. Наибольшую изменчивость по изотопному составу кислорода демонстрирует циркон из обр. 3-2-23. Значительная часть фигуративных точек для него находится в области древней континентальной коры, вблизи циркона из обр. 3-2-11. Единичные точки попадают в

поле циркона, испытавшего гидротермальное воздействие. Циркон из обр. 3-2-55 отчётливо расположился в области гидротермально преобразованного циркона. Приведенные данные отражают множественность источников поступления ксенокристов циркона в породы хребта Шака.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого комплексного минералого-геохимического и изотопного исследования, определены особенности природы магматических пород хребта Шака, а также установлен ксеногенный циркон в их составе и выявлены возможные источники его поступления.

Магматические породы, слагающие хребет Шака контаминированы материалом континентальной коры. Присутствие пижонита в исследуемых породах позволяет определить их принадлежность к толеитовой серии и оценить условия кристаллизации: высокая температура ($> 900^{\circ}\text{C}$), быстрое остывание расплава, давление, не превышающее 3 кбар.

Выявлено присутствие в составе габброидов ксеногенного циркона, имеющего большой спектр значений возраста кристаллизации – от архейских (2.8 млрд лет) до мезозойских (около 180 млн лет). Ряд геохимических характеристик позволяет считать, что рассматриваемый циркон имеет магматическое происхождение и был связан с породами континентальной коры, при этом изотопный состав кислорода продемонстрировал для части зёрен наличие мантийных изотопных меток или признаков гидротермального преобразования. Проведённый сравнительный анализ исследованных древних ксенокристов циркона и молодого по возрасту циркона из пород океанической коры показал существенные отличия в их редкоэлементном составе.

В качестве перспективы продолжения исследования проблемы нахождения разновозрастного циркона и гетерогенности мантии в пределах хребта Шака автор рассматривает

дальнейшее комплексное петрологическое и изотопно-геохимическое исследование океанических пород преимущественно на минеральном уровне.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Румянцева, Н.А.** Петрохимическая характеристика толеитов хребта Шака (Южная Атлантика) / Н.А. Румянцева, Б.Г. Ванштейн, С.Г. Скублов // Записки Горного института – 2021. – Т. 248. – С. 223-231.

2. **Румянцева, Н.А.** Состав клинопироксена как индикатор условий кристаллизации габброидов из хребта Шака (Южная Атлантика) / **Н.А. Румянцева**, А.В. Березин, Б.Г. Ванштейн, С.Г. Скублов // Новые данные о минералах – 2023. – Т. 57. – № 1. – С. 14-23.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Skublov, S.G. Zircon xenocrysts from the Shaka Ridge record ancient continental crust: New U-Pb geochronological and oxygen isotopic data / S.G. Skublov, **N.A. Rumyantseva**, Q. Li [et al.] // Journal of Earth Science – 2022. – V. 33. – P. 5-16.

4. **Румянцева, Н.А.** Циркон из габброидов хребта Шака (Южная Атлантика): U-Pb возраст, соотношение изотопов кислорода и редкоэлементный состав / **Н.А. Румянцева**, С.Г. Скублов, Б.Г. Ванштейн [и др.] // Записки Российского петрологического общества – 2022. – Т. 151. – № 1. – С. 44-73.

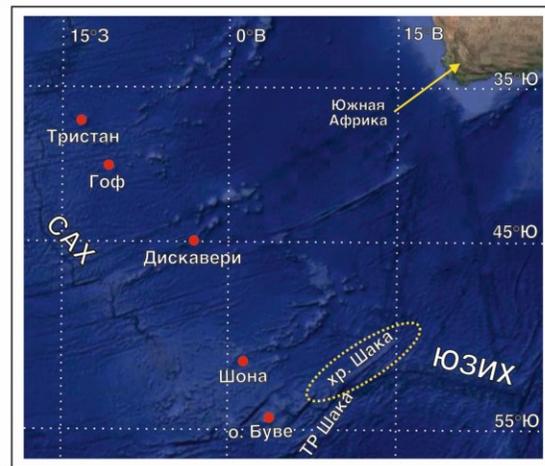


Рисунок 1 – Карта района хребта Шака. В качестве топографической основы использована информация из открытых источников (<https://www.google.com/maps>).

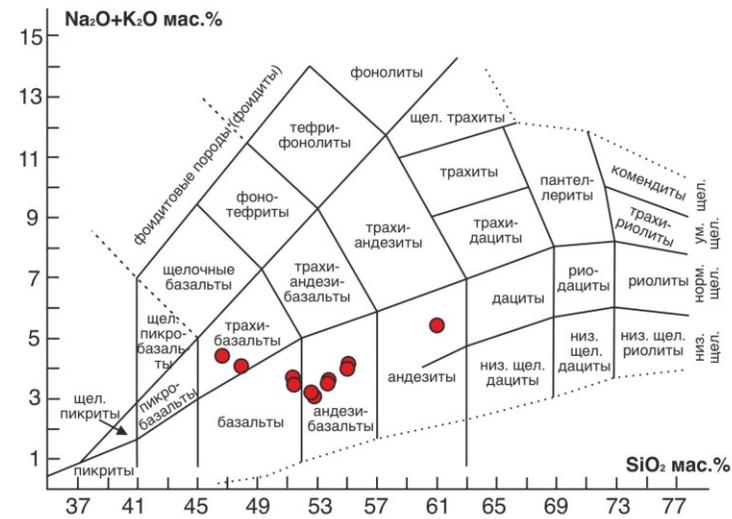


Рисунок 2 – TAS диаграмма ($\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) для магматических пород хребта Шака с фигуративными полями по (Богатиков и др., 2009).

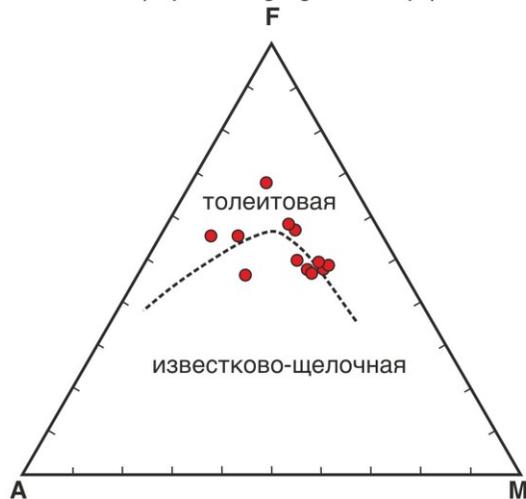


Рисунок 3 – Тройная диаграмма $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ (AFM) по (Irvine, Baragar, 1971).

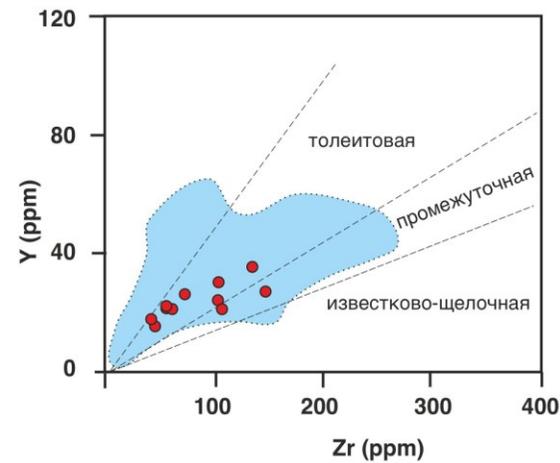


Рисунок 4 – Дискриминационная диаграмма $\text{Zr} - \text{Y}$ (в ppm). Фигуративные поля выделены по (MacLean, Barrett, 1993). Голубым облаком обозначены составы базальтоидов и габброидов САХ и ЮЗИХ, данные по которым были взяты из открытого источника – базы данных PetDB (<https://www.earthchem.org/petdb>) для сравнения.

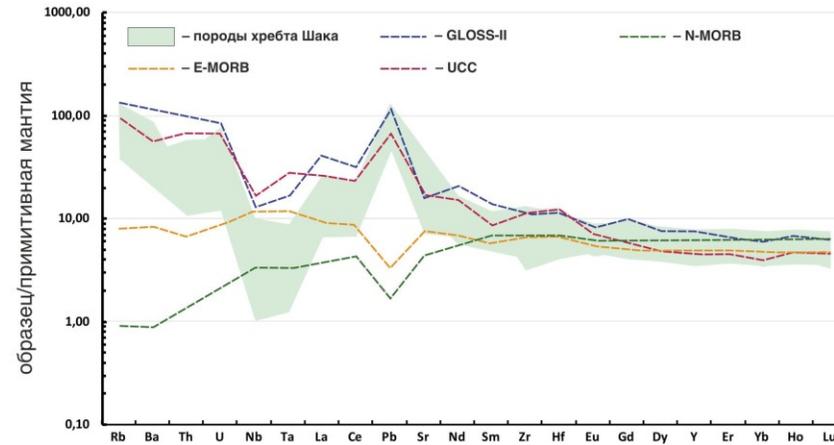


Рисунок 5 – Спектры распределения редких элементов для пород хребта Шака, нормированные на примитивную мантию по (Sun, McDonough, 1989). Эталонные составы N-MORB и E-MORB приведены по (Sun, McDonough, 1989), GLOSS-II по (Plank, 2014), UCC (состава континентальной коры) по (Rudnick, Fountain, 1995).

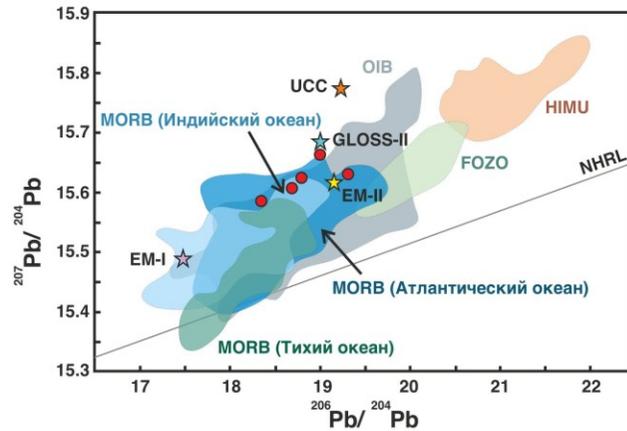


Рисунок 6 – Диаграмма в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Линия Northern Hemisphere Reference (NHRL) выделена по (Hart, 1984); фигуративные поля MORB, FOZO, OIB, HIMU выделены по базе данных (Stracke et al., 2003), мантийного резервуаров EM-I и EM-II по (Armienti, Gasperini, 2007), терригенного осадка GLOSS-II по (Plank, 2014), верхней континентальной коры по (Hemming, McLennan, 2001).

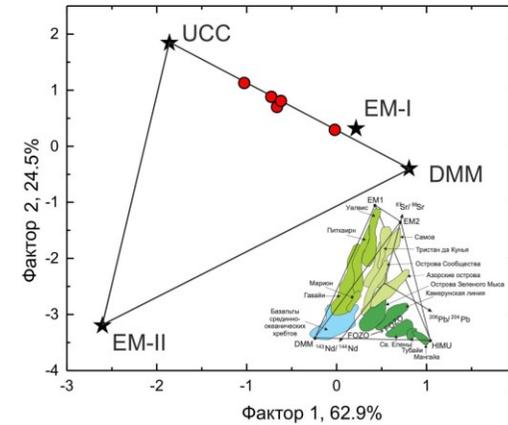


Рисунок 7 – Визуализация данных по изотопному составу Pb магматических пород хребта Шака методом главных компонент, описанному в (Dong et al., 2021), в координатах первой и второй главной компоненты. В процентах указан вес соответствующего фактора. Использованы данные изотопного состава мантийных резервуаров обогащенной мантии EM-I и EM-II по (Armienti, Gasperini, 2007), верхней континентальной коры UCC по (Hemming, McLennan, 2001), деплетированной мантии DMM по (Escrig et al., 2004). Врезка – мантийный тетраэдр по материалам (Ivanov, 2010) после (Hart et al., 1992).

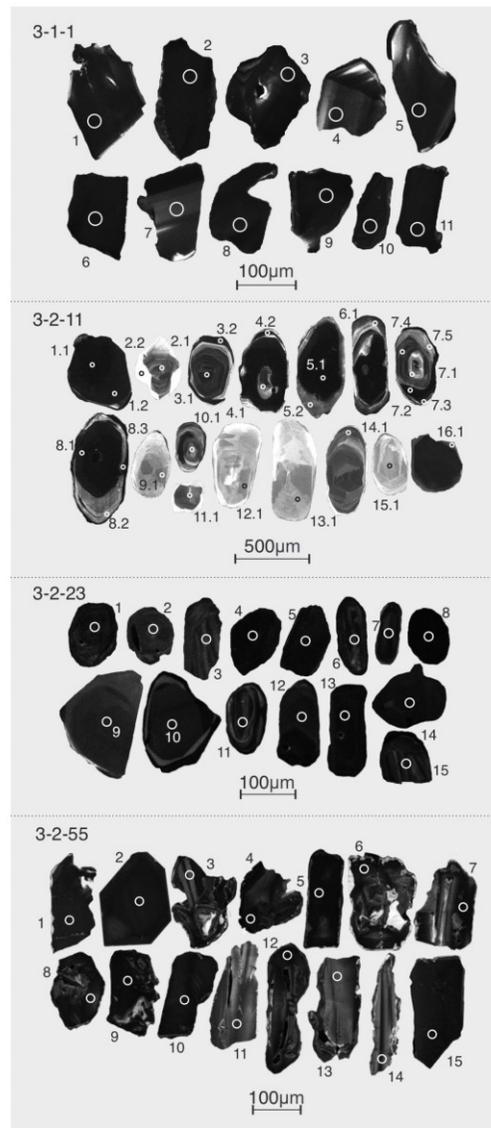


Рисунок 8 – Изображение зёрен циркона из в режиме катодолуминесценции (CL). Кружками показано положение аналитических кратеров.

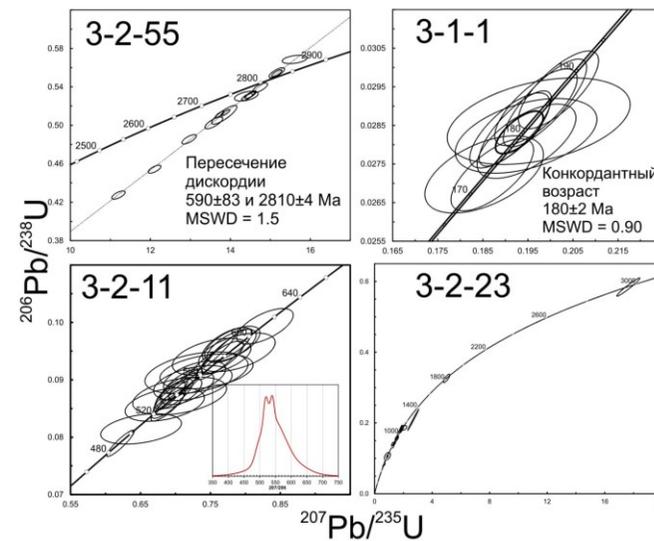


Рисунок 9 – Диаграммы с конкордией для циркона.

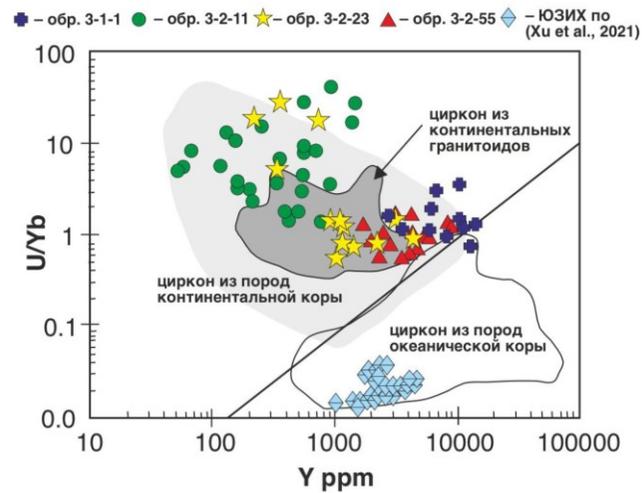


Рисунок 10 – Дискриминационные диаграмма соотношения Y (ppm) и U/Yb отношения в цирконе из пород хребта Шака и ЮЗИХ (Xu et al., 2021). Фигуративные поля выделены по (Grimes et al., 2007).

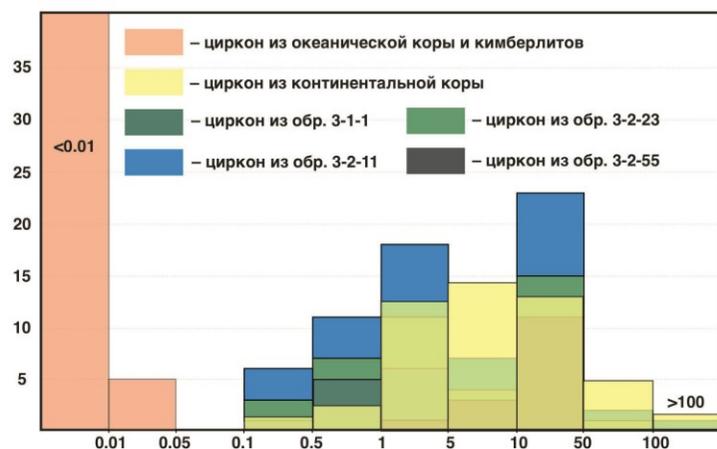


Рисунок 11 – Гистограмма содержания Li (ppm) в цирконе из пород хребта Шака. Данные по циркону из океанической и континентальной коры приведены по (Ushikubo et al., 2008; Grimes et al., 2011; Bouvier et al., 2012).

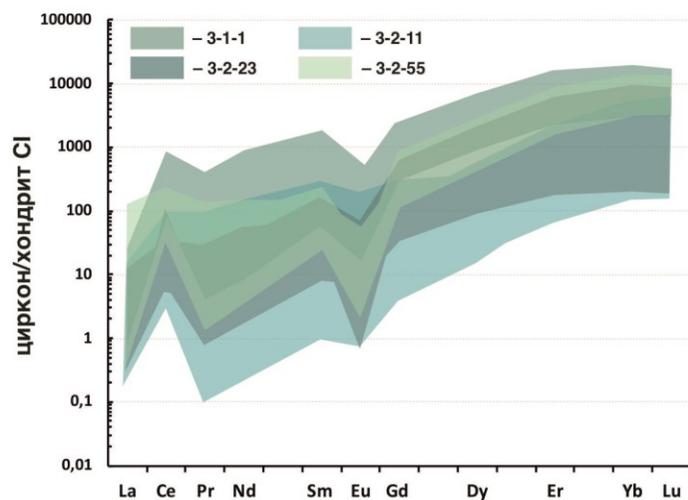


Рисунок 12 – Спектры распределения REE в цирконе, нормированные к хондриту CI (McDonough, Sun, 1995).

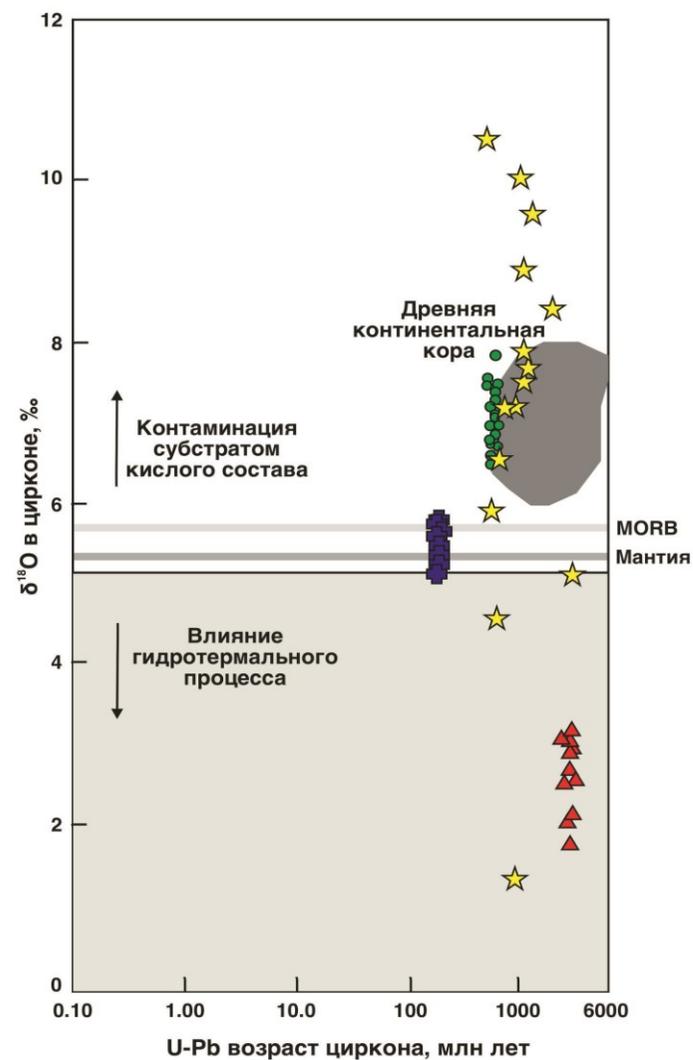


Рисунок 13 – Соотношение U-Pb возраста и изотопного состава кислорода для циркона из габброидов хребта Шака. Фигуративные поля MORB, деплетированной мантии и циркона гидротермального происхождения выделены по (Bindeman, 2008), древней континентальной коры по (Rumble et al., 2013). Использованы данные из (Бортников и др., 2022).