

На правах рукописи



ЧЕБОТАРЕВ Дмитрий Александрович

ПЕТРОГЕНЕЗИС И НИОБИЙ-РЕДКОЗЕМЕЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ЧУКТУКОНСКОГО  
ЩЕЛОЧНОГО УЛЬТРАОСНОВНОГО КАРБОНАТИТОВОГО МАССИВА, ЗАПАД СИБИРСКОЙ  
ПЛАТФОРМЫ

Специальность 25.00.04 - петрология и вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Дорошкевич Анна Геннадьевна, доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией рудоносности щелочного магматизма.

Официальные оппоненты:

Врублевский Василий Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры динамической геологии Национального исследовательского Томского Государственного Университета.

Арзамасцев Андрей Александрович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и геохронологии докембрия РАН, профессор кафедры Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета.

Ведущая организация:

ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск)

Защита состоится 24 апреля 2020 г в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 003.067.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале.

Адрес: проспект Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090.

Факс: +7 (383) 333-27-92

e-mail: science@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института

Автореферат разослан 10.03.2020

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор геол.-мин. наук О.М. Туркина



## Введение

### Актуальность работы

Деятельность мантийных плюмов, как правило, сопровождается ареалами развития щелочного, и, в том числе, карбонатитового магматизма, образованием больших изверженных провинций, к которым приурочены крупные месторождения разнообразных полезных ископаемых (Когарко, 2006; Ernst, Bell, 2010). Одной из крупнейших изверженных провинций мира является Сибирская трапповая провинция Сибирской платформы (Добрецов и др., 2003, 2010; Борисенко и др., 2006; Reichow et al., 2008; Sobolev et al., 2011), с которой сопряжены месторождения железных руд Ангаро-Витимского района, медно-никель-платиноидные месторождения Норильского рудного района, редких (РЗЭ, Nb и др) и радиоактивных (U, Th) элементов - Маймеча-Котуйская провинция, Чуктуконское месторождение на Чадобецком поднятии.

Именно с карбонатитами связаны крупнейшие месторождения Nb, Ta и РЗЭ в мире. В России из 4 самых богатых карбонатитовых Nb-редкоземельных месторождений (Томтор, Ловозеро, Чуктуконское, Белозиминское) только Чуктуконское месторождение рекомендовано к разработке, находится в экономически развитом регионе и хорошо изучено. Поэтому изучение его генезиса, минерального состава и геохимических особенностей руд является важным как в фундаментально-научном, так и в прикладном значении. Это важно для прогноза и поиска Nb-РЗЭ месторождений и разработки эффективных технологий переработки руд.

Карбонатитовые расплавы обладают низкой вязкостью и крайне высокой подвижностью, что позволяет им просачиваться через отличающиеся по своему составу породы мантии даже в виде тончайшей пленки в межзерновом пространстве, выступая, таким образом, активными агентами переноса вещества и метасоматоза пород мантии, что способствует формированию в ней геохимических неоднородностей и доменов, обогащенных несовместимыми элементами (Sweeney, 1994; Когарко, 2005, 2006 а, б, в). В таких метасоматизированных доменах мантии складываются благоприятные условия для зарождения разнообразного щелочного магматизма и образования широкого семейства щелочных пород: от непосредственно карбонатитов до более обогащенных кремнеземом пород, таких как, например, кимберлиты (Breu et al., 2009). Изучение проявлений щелочного магматизма, особенно при сочетании карбонатитов и щелочных силикатных пород, предоставляет ценнейшую информацию о состоянии мантии и проходивших в ней процессов в различные геологическое время. Примером такого проявления является Чуктуконский массив в составе Чадобецкого щелочно-ультраосновного комплекса Чадобецкого поднятия.

Чадобецкое поднятие расположено на западной окраине Сибирской платформы, на периферии области распространения Сибирской трапповой провинции. В составе поднятия выделяют два массива щелочных магматических пород: Териновский на севере поднятия и Чуктуконский на юге. На территории поднятия с 1960-х годов проводились многочисленные работы по поиску полезных ископаемых, в результате которых была систематизирована информация о магматических породах поднятия, оценен их возраст и выявлено Чуктуконское ниобий-редкоземельное месторождение. Однако исследований по характеристике источника магматических пород не проводились, а информация в опубликованной научной литературе, в основном, характеризует породы Териновского массива, в то время как подробная информация о возрасте, минералогии и геохимии щелочных пород Чуктуконского массива практически отсутствует.

В данной работе представлены результаты геохронологического, петролого-минералогического и геохимического (включая изотопные) исследования щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов Чуктуконского массива с целью характеристики источников вещества, петрогенезиса, эволюции ниобиевой и редкоземельной минерализации, приведшей к образованию Чуктуконского ниобий-редкоземельного месторождения.

**Объект исследований:** щелочные породы и руды Чуктуконского щелочного массива

**Цель исследования:** изучить петрогенезис пород, ниобиевое и редкоземельное оруденение в магматических породах и коре выветривания Чуктуконского массива.

Для достижения этой цели решались **следующие задачи:**

- Определение хронологии развития процессов магматизма и рудообразования по геохимическим и изотопно-геохронологическим данным

- Получение минералогических, петролого-геохимических и изотопно-геохимических характеристик щелочных силикатных пород, карбонатитов и кор выветривания по ним
- Характеристика источников вещества пород массива

#### **Фактический материал и методы исследования:**

В работе использована коллекция образцов зерна скважин Чуктуконского массива, полученных в результате геологосъемочных работ ГДП-200 в 2008-2010 годах компанией ОАО «Красноярскгеолсъемка» и предоставленных ею. Из образцов зерна изготовлены прозрачно-полированные и неполированные шлифы и аншлифы в количестве 55 штук для анализа оптическими методами.

Валовый состав пород определялся методом РФА (22 анализа), редкоэлементный состав пород определялся методом ICP-MS (22 анализа) в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН (АЦ ИГМ СО РАН). Изотопия стронция и неодима определялась на мультиколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT 262 с использованием Re- и Ta-филаментов в статическом режиме (12 анализов) в геологическом институте Кольского научного центра РАН (Апатиты, Россия).

Детальное изучение особенностей состава минералов производилось методами ЭДС на аппарате TESCAN MIRA 3 LIMU (327 анализов), ВДС на аппарате Camebax Micro (101 анализ). Примеси редких элементов в минералах определены методами LA ICP-MS (170 анализов) на установке ESI New Wave UP193FX (Университет Эрлангена, Германия) и ICP-MS (84 анализа) на установке Finnigan MAT (Университет Бремена, Германия).

Датирование пород произведено методами U-Pb SIMS SHRIMP II (2 анализа, ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург), LUV213 (NewWave/Mer-chantek) в сочетании с Agilent 7500cs ICP-MS (1 анализ, GEMOC-центр Университета Маквори, Сидней, Австралия) и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (1 анализ) (АЦ ИГМ СО РАН). Для датирования были использованы минералы, формировавшиеся непосредственно из силикатного и карбонатного расплавов и в коре выветривания (перовскит из щелочных ультраосновных пород; риппит из кальцитовых карбонатитов; монацит из коры выветривания по карбонатитам).

#### **Научная новизна:**

Были получены новые данные по минеральному и химическому составу пород и кор выветривания по ним, особенностям химического состава минералов. Особое внимание уделено детальной характеристике ниобий-редкоземельной минерализации карбонатитов и коры выветривания по ним.

Открыт новый минерал риппит,  $\text{K}_2(\text{Nb,Ti})_2(\text{Si}_4\text{O}_{12})\text{O}(\text{O,F})$ , содержащийся в кальцитовых разновидностях карбонатитов. Содержание ниобия в его составе до 45 мас.%  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  позволяет отнести его к рудным ниобиевым минералам. Также содержание в минерале калия до 15 мас.%  $\text{K}_2\text{O}$  позволяет использовать его в качестве геохронометра, что было впервые выполнено в данной работе.

Получены возрастные интервалы формирования пород массива, включая кору выветривания по ним. Определено, что становление магматических пород происходило в период деятельности мантийного суперплюма, формировавшего триасовую Сибирскую изверженную провинцию.

Впервые получена геохимическая и Sr-Nd изотопная характеристика пород массива. Показано, что образование первичных расплавов происходило из умеренно деплетированного мантийного источника. Высокое содержание магматического карбоната и несовместимых элементов свидетельствуют в пользу того, что вероятный мантийный источник претерпел карбонатный метасоматоз.

#### **Защищаемые положения:**

1. Возраст айлицитов первой фазы ( $252 \pm 12$  млн лет, U-PbБ перовскит) и дамтьеритов третьей фазы ( $256,7 \pm 1,1$ , U-Pb, циркон) Чуктуконского массива отвечают пермо-триасовому периоду магматической активности на Сибирской платформе.

2. Материнские расплавы пород Чуктуконского массива образовались из изотопно умеренно деплетированного мантийного источника, в результате частичного плавления карбонатизированного гранат-содержащего мантийного перидотита под действием плюма.

3. Ниобий-редкоземельная минерализация карбонатитов Чуктуконского массива представлена фторкальциопирохлором, риппитом, ниобий-содержащим рутилом, дациншанитом-(Ce), бурбанкитом, фтор-апатитом. На этапе гидротермального преобразования карбонатитов этот набор минералов сменился на оксикальциопирохлор и Sr-Ba-PЗЭ разновидность пирохлора, ниобий-содержащие гидроксиды железа,

высоко ниобиевый брукит, фторкарбонаты РЗЭ (паризит-(Ce), синхизит-(Ce)), монацит-(Ce), олекминскит, черчит-(Y), флоренсит-(Ce). Ниобий-редкоземельная минерализация в коре выветривания представлена ниобий-содержащими гидроксидами железа, монацитом-(Ce), флоренситом-(Ce), черчитом-(Ce).

#### **Практическая значимость:**

Полученные новые данные о составе пород и минералов способствуют составлению более точных и эффективных технологических схем извлечения рудных основных и попутных компонентов при разработке месторождения, реконструкции процесса рудообразования и разработке поисковых критериев.

Был открыт новый рудный минерал - риппит. Помимо того, что минерал может быть использован в качестве руды на ниобий и геохронометра, минерал обладает нелинейными оптическими свойствами. Исследование его физических свойств представляется значимым для исследований в области преобразования частоты лазеров в технике промышленного, медицинского и военного назначения, в лазерных локаторах и оптической связи.

#### **Апробация работы и публикации:**

Материалы, изложенные в этой работе, опубликованы в 3 российских и зарубежных журналах по списку ВАК, докладывались на 4 международных конференциях:

1. Международная школа по наукам о Земле (I.S.E.S. – 2016) (Москва),
2. Международная конференция Щелочной магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов (Москва, 2016),
3. Международная конференция магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов (Миасс, 2017),
4. XI-ая Международная школа по наукам о Земле I.S.E.S. – 2017 (Миасс, 2017).

Результаты также были отмечены наградами:

1. Дипломом Российского Минералогического Общества «За установление и открытие нового минерала»;
2. Дипломом III степени Российского минералогического Общества за научную статью «Evolution on Nb-mineralization in Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland (Krasnoyarsk territory, Russia)»;
3. Грамотой Правительства Новосибирской области по проведению перспективных научных исследований и разработок по приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Новосибирской области.

#### **Объем и структура работы:**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем работы составляет 134 страницы, включая 30 рисунков и 28 таблиц.

#### **Благодарности:**

Глубокая благодарность, признательность и уважение своему научному руководителю Анне Геннадьевне Дорошкевич за этот долгий и тяжёлый путь, пройденный совместно во время написания этой работы. За наставничество, терпение, благожелательность и ценнейшие советы, за интереснейшую и разнообразную работу в замечательной лаборатории. Также автор выражает благодарность коллективам лабораторий рудоносности щелочного магматизма (№215) и экспериментальной минералогии и кристаллогенезиса (№453) ИГМ СО РАН и лично Александру Григорьевичу Соколу.

### **Геологическая характеристика Чуктуконского массива**

Чуктуконский карбонатитовый массив входит в состав Чадобецкого магматического комплекса, расположенного на юго-западной окраине Сибирской платформы и трапповой провинции, в 575 км на северо-восток от г. Красноярска и в 100 км от Богучанской ГЭС. Чадобецкое поднятие расположено на пересечении Иркинеево-Катангского и Братско-Ковинского авлакогенов и Тунгусской рифтогенной зоны.

Поднятие представляет собой куполовидное сооружение эллипсоидной формы с размерами осей 45 и 35 км. Ядро поднятия, образующее два выступа – северный (Териновский массив) и южный (Чуктуконский массив), сложено карбонатно-терригенными докембрийскими и раннекембрийскими отложениями. Внешнее обрамление поднятия образовано полями развития траппов долеритового и габбро-долеритового состава в субгоризонтальных пермо-карбонатовых терригенных отложениях и пермо-триасовых туфах (Кириченко и др., 2012; Скляр, 1971; Анучин, Лисицын, 1992).

Чуктуконский щелочно-ультраосновной массив образовался в результате трёх фаз внедрения: в первую фазу образовались щелочно-ультраосновные породы (мелилититы, пироксениты, щелочные пикриты, айлликиты), во вторую - карбонатиты, в третью фазу произошло внедрение кимберлитов и дамтьернитов (Скляр, 1971; Лапин, Толстов, 1991; Анучин, Лисицын, 1992, Лапин, 1992; Лапин, Пятенко, 1992; Лапин, 1997; Лапин, 2001; Лапин, Лисицын, 2004; Кириченко и др., 2012; Лапин и др., 2016). Породы первой и второй фаз образуют штокообразные массивы, дайки и силлы. Карбонатиты секут породы первой фазы. Породы третьей фазы слагают трубки взрыва, имеют секущие контакты с породами ранних фаз и содержат их ксенолиты. Все породы массива в значительной степени подверглись вторичным изменениям и перекрыты мощной корой выветривания, содержащей промышленные запасы ниобия, редких земель и фосфора.

Щелочно-ультраосновные породы первой фазы имеют порфирировидную структуру с тонкозернистой основной массой. Вкрапленники оливина(?) и клинопироксена(?), полностью замещенные серпентином, погружены в основную массу, представленную преимущественно вторичными минералами группы хлорита, кальцитом и первичными флогопитом, перовскитом, Cr-шпинелью в магнетитовой оторочке и гроссуляр-андрадитовым гранатом.

Карбонатиты представляют собой мелко- и среднезернистые кальцитовые разновидности белого и коричневого цветов разных оттенков с массивной, пятнистой, реже полосчатой текстурой. Основным минералом в них является кальцит, второстепенными и акцессорными – доломит, фторкальциопироксид, Nb-рутил, пирит, риппит, калиевый полевой шпат, тайниолит, олекминскит, фторапатит, флюорит, анкилит-(Ce) (Чеботарев и др., 2016; Sharygin et al., 2016; Doroshkevich et al., 2016; Sharygin et al., 2016 a, b; Sharygin, 2017; Sharygin, Doroshkevich, 2017; Chebotarev et al., 2017). Карбонатиты в разной степени преобразованы гидротермальными процессами от слабых до весьма интенсивных, приведших к образованию кварца, барита, гётита, псиломелана (романешит±голландит), паризита-(Ce), синхизита-(Ce), монацита-(Ce), франколита (карбонат-фторапатит), флоренсита-(Ce) и Ba-Sr-гидропироксидов.

Ультраосновные породы третьей фазы внедрения имеют голубовато-серый, зеленоватый цвет и брекчиевидную текстуру. Обломки различных пород и минералов достигают первых сантиметров и могут составлять до 60% породы. Среди обломков присутствуют фрагменты щелочных ультраосновных пород первой фазы внедрения, карбонатитов и вмещающих пород. Форма обломков варьирует от угловатой до овально-округлой. Обломки пород и макрокристы флогопита, доломита и оливина(?) погружены в тонкозернистую матрицу, сложенную доломитом, кальцитом, калиевым полевым шпатом, хлоритом. В основной массе также отмечаются флогопит, апатит, пирит, рутил, хромит, магнетит, кварц, редко ильменит, диопсид, стронцианит, дациншанит-(Ce), барит. Особенностью пород является присутствие большого количества лапиллей, в ядре которых находятся макрокристы флогопита либо кристаллы оливина или пироксена, полностью замещенные агрегатом доломита и кварца. Ядра окружены тонкозернистым материалом, сложенным лейстами доломита, калиевого полевого шпата с вкраплениями рутила, апатита, магнетита и флогопита. Эти породы претерпели гидротермальные изменения и карбонатитизацию: некоторые образцы переработаны до глинообразного состояния и имеют коричнево-серый цвет, рыхлую структуру.

## Раздел 1. Геохронология Чуктуконского массива.

Время образования щелочных ультраосновных пород первой фазы внедрения (айлликитов) было оценено по 12 определениям значений отношений  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  и  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  в перовските. На диаграмме Тера-Вассербурга (рис. 2 а) нижнее пересечение дискордии с конкордией соответствует возрасту  $253 \pm 13$  млн лет. Средневзвешенное значение возраста по 12 точкам составляет  $252 \pm 12$  млн лет (рис. 2 б).

Определенный  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возрастной спектр риппита из карбонатитов состоит из 9 ступеней, полученных в интервале температур от 500 до 1130°C. В спектре минерала выделяется плато по 7 ступеням с возрастом  $231,1 \pm 2,7$  млн лет, характеризующееся 97% выделенного  $^{39}\text{Ar}$  (рис. 2 в).

Возраст внедрения щелочных ультраосновных пород третьей фазы (дамтьернитов) оценен по датировке кристаллов циркона по 6 измеренным отношениям  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  (рис. 2 г). Средневзвешенное значение возраста по ним соответствует  $256,7 \pm 1,1$  млн лет (рис. 2 д).

Все проанализированные зерна монацита из коры выветривания имеют нарушенную U-Pb систему. Монацит характеризуется высокими содержаниями нерадиогенного свинца (табл. 4.4). Минимальный возраст кристаллизации, определенный по нижнему пересечению дискордии с конкордией в координатах Тера-Вассербурга, соответствует  $96 \pm 26$  млн лет (рис. 2 е). Скорректированный на измеренный обыкновенный Pb возраст по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  составляет  $102,6 \pm 2,9$  млн лет.

Полученные значения возраста щелочных ультраосновных пород первой и третьей фазы внедрения Чуктуконского массива позволяют говорить о том, что их формирование сопряжено по времени с трапповым магматизмом Сибирского кратона (н-р: Добрецов, 2003, 2010; Reichow et al., 2008; Ivanov et al., 2013). Имеющиеся геохронологические и изотопные данные показывают, что субсинхронный покровному базальтовому вулканизму Сибирской платформы щелочной магматизм был проявлен в северной ее части. Так, например, практически одновременно с траппами были сформированы карбонатиты Гулинского массива и щелочные ультраосновные вулканы (253-245 млн лет) Маймеча-Котуйской провинции (Basu et al., 1995; Dalrymple et al., 1995; Когарко и Зартман, 2011; Малич и др., 2015; Васильев, Гора, 2017 и др).

Устойчивость аргоновой системы риппита в P-T параметрах не изучена. Более молодая датировка риппита из карбонатитов, вероятно, вызвана переустановкой аргоновой системы минерала вследствие более поздних тектоно-термальных событий.

Возраст, полученный по монациту, может характеризовать время формирования коры выветривания по карбонатитам. Это событие на 130 млн. лет позже времени кристаллизации пород Чуктуконского массива и отражает общую геологическую историю развития района. Тектонические движения и магматическая активность в период 250-230 млн. лет сформировали Чадобецкое поднятие и, как следствие, тектонически ослабленные зоны в его пределах. В юре - раннем мелу, в обстановке спокойного тектонического режима и теплого гумидного климата (Семихатов, Чумаков, 2004) происходило интенсивное формирование мощной коры выветривания. Имеющиеся палеогеновые значения возраста (споро-пыльцевой метод) коры выветривания (Кириченко и др., 2012) несколько отличаются от полученной нами U-Pb датировки, что связано с определенной относительностью споро-пыльцевого метода.

## **Раздел 2. Петрохимическая и геохимическая характеристика пород Чуктуконского массива.**

Айликиты первой и дамтьерниты третьей фазы внедрения характеризуются низкими содержаниями кремния (до 26 мас.%  $\text{SiO}_2$ ), обогащены CaO (до 28 мас.%),  $\text{TiO}_2$  (до 3,6 мас.%) и имеют высокий Mg# (75-85). Дамтьерниты содержат больше  $\text{K}_2\text{O}$  (до 2,5 мас.%), чем породы первой фазы (до 0,9 мас.%), что выражается в большем количестве флогопита в них.

Породы обогащены легкими редкоземельными элементами (LREE) -  $\text{La}_{\text{cn}}/\text{Yb}_{\text{cn}}$  варьирует от 33 до 144,  $\text{Gd}_{\text{cn}}/\text{Yb}_{\text{cn}}$  варьирует от 3,5 до 6,4. Графики нормированных к примитивной мантии содержаний редких элементов для айликитов и дамтьернитов схожи между собой и показывают значительное обогащение Nb и PЗЭ и отрицательные аномалии по Rb, Ta, K, Pb, Zr и Hf (рис. 3 а, в). Айликиты и дамтьерниты характеризуются содержаниями Ni до 350 ppm и Cr до 700 ppm, что наряду с высоким Mg# является типичным для расплавов, образованных из мантии. Ce/Pb и Nb/U отношения высоки и сильно варьируют: от 6 до 35 для Ce/Pb и от 34 до 434 для Nb/U (Ce/Pb для PM составляет 9,6, Nb/U – 34), что свидетельствует о незначительном участии корового материала. Конфигурации мультиэлементных спектров щелочных ультраосновных пород Чуктуконского массива также демонстрируют сходство с таковыми для щелочных ультраосновных пород Териновского массива.

Карбонатиты по содержанию CaO, MgO и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  относятся к кальциокарбонатитам. Содержание  $\text{SiO}_2$  в образцах наименее измененных карбонатитов составляет 0,5-3,3 вес.% и резко повышается до 15-24 вес.% в претерпевших гидротермальные изменения. Также в гидротермально измененных карбонатитах резко падает содержание CaO до 37-43 вес.% и повышается  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до 3,3-5,6 вес.%. Содержание щелочей ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) низкое для всех разновидностей карбонатитов. Породы обогащены легкими PЗЭ (с  $\text{La}/\text{Ybn}$  от

34 до 220), Sr, Ba, Th, U, Nb и другими элементами (рис. 3 б, г). По сравнению с щелочными ультраосновными породами первой и третьей фазы внедрения, карбонатиты имеют более низкие концентрации Rb, Ta, K, Zr, Hf, Ti, Cr и Ni и более высокое содержание РЗЭ и Y.

В коре выветривания отмечается большое количество фосфора (до 16 мас.%  $P_2O_5$ ) и алюминия (до 7 мас.%  $Al_2O_3$ ), примеси MnO (до 5 мас.%) и BaO (до 1 мас.%). Валовое содержание РЗЭ в коре выветривания варьирует, но выше относительно карбонатитов и щелочных ультраосновных силикатных пород с преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми ( $La_{cn}/Yb_{cn}$  до 160) (рис. 3 б). Кора выветривания обогащена Zn, Th, U, Nb, Pb и РЗЭ относительно магматических пород (рис. 3 г). Тем не менее, конфигурации графиков содержания рассеянных элементов, нормализованных на содержания в примитивной мантии, в коре выветривания и щелочных породах схожи между собой. При выветривании пород массива произошло значительное увеличение содержания Zn, Th, U, Nb, Pb и РЗЭ в коре выветривания относительно первичных магматических пород (рис. 3 б, г) до промышленно значимых концентраций. Значения  $^{87}Sr/^{86}Sr$  и  $\epsilon Nd$  коры выветривания составляют 0,70368 и 0,70384 и +4,1 и +4,2, соответственно, и схожи с таковыми для магматических пород Чуктуконского массива (рис. 4).

Высокие магнезиальный номер, содержания никеля и хрома в ультраосновных щелочных породах Чуктуконского массива дают основания предположить, что они формировались из расплавов, не претерпевших значительной фракционной кристаллизации. Их достаточно однородные изотопные характеристики  $\epsilon Nd$  от +4,2 до 5,3 и  $^{87}Sr/^{86}Sr$  (I) от 0,7024 до 0,7036 (рис. 4) указывают на общий относительно однородный умеренно деплетированный мантийный источник. Высокое содержание несовместимых элементов в породах Чуктуконского массива (Sr и Nb, La/Sm отношение) свидетельствуют в пользу того, что источник подвергся карбонатному метасоматозу. Это подтверждается микроэлементным составом оливина щелочных ультраосновных пород Чадобецкого поднятия, выражающегося в наличии переходной зоны, обогащенной Sr, возникшей вследствие карбонат-содержащим айликиновым расплавом с перидотитами при 2,5-3,5 ГПа (Nosova et al., 2018). Кроме того, обогащение легкими РЗЭ и низкие концентрации тяжелых РЗЭ и Y, высокие Gd/Yb отношения щелочных ультраосновных пород Чуктуконского массива могут указывать на то, что они были сформированы из гранат-содержащего источника при низкой степени частичного плавления. Наличие на графиках, нормированных к РМ отрицательных аномалий по Rb, K и Pb относительно высокозарядных элементов и легких РЗЭ, а также обилие флогопита как во вкрапленниках, так и в основной массе силикатных пород третьей фазы Чуктуконского массива дают основание предположить, что источник также содержал флогопит или иную слюду.

Одновозрастные породы Чуктуконского массива и Маймеча-Котуйской провинции (меймечиты, щелочные пикриты, меланефелиниты и породы Гулинского щелочного ультраосновного-карбонатитового комплекса) имеют перекрывающиеся Sr-Nd изотопные составы (рис. 4), что позволяет предположить, что первичные расплавы для пород этих комплексов образовались из мантийных источников под Сибирским кратоном, обладающих весьма близкими изотопными характеристиками. Геохимические характеристики щелочных силикатных пород Чуктуконского массива, пород Маймеча-Котуйской провинции и рассчитанного первичного расплава меймечитов (Sobolev et al., 2009) также весьма схожи между собой (рис. 3 в).

Некоторые исследователи (Kogarko, Ryabchikov, 2000; Рябчиков и др., 2009) предположили, что первичные меймечитовые магмы были образованы под воздействием мантийного плюма в результате частичного плавления фертильного лерцолита в астеносфере с последующим взаимодействием образованных расплавов с литосферным мантийным материалом (гарцбургит). Соболев с соавторами (Соболев и др., 2009) предложили схожую модель формирования первичного меймечита. Отличие их модели заключается в том, что метасоматический агент представлял собой силикатно-карбонатный расплав, образованный плавлением древней рециклированной океанической коры (в виде карбонатсодержащего эклогита), транспортированной мантийной струей пермотриасового возраста. Сибирские траппы, имеющие пространственную и временную связь с щелочными породами Чуктукона и Маймеча-Котуя, также рассматриваются как продукты деятельности мантийного плюма (например, Vasu et al., 1995; Arndt et al., 1998; Рябчиков и др., 2009; Соболев и др., 2009). Хотя изотопные составы базальтов значительно отличаются от таковых для пород Чуктукона и Маймеча-Котуя (рис. 2) и свидетельствуют в пользу участия континентального литосферного материала в базальтовом источнике (например, Sharma et al., 1992; Lightfoot et al., 1993; Wooden et al., 1993; Fedorenko et al., 1996; Carlson et al., 2006). С другой стороны, составы меймечитов, щелочных пород Гули и Чуктукона лежат на начальной точке линейного

тренда Sr-Nd изотопного состава сибирских базальтов, что может свидетельствовать в пользу их генетической связи с Сибирским мантийным плюмом.

### Раздел 3. Особенности состава и изменения ниобиевой минерализации.

Проведенный петролого-минералогический анализ пород показал, что набор минералов ниобия различный в породах Чуктуконского массива. В айликитах и дамтьернитах ниобий содержится в пирохлоре, перовските и рутиле, но общая его концентрация в этих породах невелика. Богатейшая ниобиевая минерализация формируется в результате внедрения карбонатитов. В первичных карбонатитах Nb находится в фторкальциопирохлоре, риппите и рутиле (рис. 5 а, б, в, г, д, е).

Основным концентратом ниобия в карбонатитах является пирохлор. Главным катионом на позиции В в пирохлорах является ниобий, что соответствует составу группы пирохлора (Atencio et al., 2010; Hogarth, 1977) с вариациями на позициях А и Y. Кристаллы содержат включения кальцита, стронцианита, фторапатита и вторичных включений барита. Для кристаллов первичного пирохлора характерна осцилляционная зональность с колебаниями содержаний Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (от 59 до 67 вес. %), TiO<sub>2</sub> (от 2,8 до 5 вес. %), SiO<sub>2</sub> (до 3,3 вес. %), CaO (от 15,9 до 17,7 вес. %), Na<sub>2</sub>O (от 7 до 8,2 вес. %) и F (от 4,5 до 5,1 вес. %).

Вторым по содержанию и концентрации ниобия в карбонатитах является риппит (42-45 мас.% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) (рис. 5 ё). Это новый минерал, открытый в ходе данного исследования (Doroshkevich et al., 2016; Sharigyn et al., 2016). Минерал образует бесцветные призматические кристаллы размером до 0,5-2 мм со слабой зональностью по содержанию Si и Nb. В них встречаются включения первичного пирохлора, кальцита и включения вторичных барита и кварца. Большинство кристаллов имеют в своем химическом составе небольшое количество TiO<sub>2</sub> (до 0,7 вес. %). Изредка кристаллы имеют узкую каемку с повышенным содержанием Ti (до 4,4 вес. % TiO<sub>2</sub>). Содержания рассеянных элементов не превышают 220 ppm.

Рутил(?) в карбонатитах характеризуется небольшими примесями Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (до 1 мас.%) и FeO (до 1,5 мас.%).

Редкоземельная минерализация в первичных карбонатитах представлена ассоциацией дациншанит-(Ce) + бурбанкит + стронцианит + барит, обнаруженной во включениях в кальците карбонатитов (Шарыгин и др., 2016). Первичный фторапатит характеризуется примесью SiO<sub>2</sub> до 0,5 вес.% и SrO до 2,3 вес.%. В числе кристаллических включений были выявлены Nb-брукит, разнообразные фосфаты и карбонаты, барит, стронцианит и голландит. Наиболее распространенной фазой включений является бурбанкит (Na,Ca)<sub>3</sub>(Sr,Ba,Ce)<sub>3</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>5</sub>. Минерал характеризуется высоким содержанием редкоземельных элементов (мас.%): La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 2,9; Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от 3,6 до 4,5, Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,5; Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 0,9 (Шарыгин и др., 2016).

Гидротермальное изменение карбонатитов приводит к разрушению описанных первичных минералов и формированию новых ассоциаций. В пирохлорах под действием гидротермальных растворов происходит растворение кристаллов, вынос натрия, кальция и фтора с образованием корродированных кристаллов с пятнистой зональностью и замещением катионов и образовавшихся вакансий на позиции А Sr, Ba, Pb и лёгкими РЗЭ (рис. 5 г, д, е, 6, 7). Риппит также неустойчив при гидротермальном изменении и растворяется. Образуется ниобий-содержащий гетит (рис. 5 г) с содержанием Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> до 2 мас.%.

В прожилках гидротермального кварца обнаружены высоко ниобиевый брукит (до 17 мас.% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), монацит-(Ce) и спутанно-волокнистые агрегаты фторкарбонатов редких земель (паризита-(Ce) и синхизита-(Ce)). Бурбанкит образует кристаллы размером до десятых долей мм и кристаллические агрегаты (рис. 5 ж). Брукит представлен кристаллами с осцилляционной и секториальной зональностью типа «песочных часов», с вариациями по содержанию TiO<sub>2</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и FeO:  $3\text{Ti}^{4+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{Nb}^{5+}$ .

Процессы выветривания привели к полной смене как первичных ассоциаций ниобиевых и редкоземельных минералов (за исключением ниобиевого рутила, оставшегося в виде редких обломков в основной массе), так и образованных на этапе гидротермального преобразования, а также к формированию в коре выветривания ниобий-содержащего гетита с содержанием Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> до 4 мас.%, монацита-(Ce), черчита-(Y) и флоренсита-(Ce) (рис. 5 з, и, к, л).

### Заключение

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Возраст щелочных ультраосновных пород первой фазы внедрения Чуктуконского массива, классифицированных как айликиты, определен как 252±12 млн лет. Возраст карбонатитов,

образовавшихся во вторую фазу внедрения, соответствует  $231,1 \pm 2,7$  млн лет. Возраст щелочных ультраосновных пород третьей фазы внедрения, классифицированных как дамтьерниты, определен как  $256,7 \pm 1,1$  млн лет.

2. Карбонатиты являются кальцитовыми разновидностями с богатой ниобий-редкоземельной минерализацией и оруденением, представленными фторкальциопироксидом, риппитом, ниобий-содержащим рутилом, дациншанитом-(Ce), бурбанкитом, стронцианитом.

3. Риппит является новым минералом, установленном впервые в карбонатитах Чуктуконского массива, и использованном в качестве геохронометра. Гидротермальное изменение карбонатитов приводит к изменению фторкальциопироксидов по принципу ионного обмена с замещением натрия, кальция и фтора вакансиями и формированию высокониобиевого брукита, ниобий-содержащих гидроксидов железа, фторкарбонатов редких земель (паризита-(Ce), синхизита-(Ce)), монацита-(Ce), олекминскита.

4. Процессы выветривания привели к изменению состава пироксидов на разновидности, обогащенные Sr, Ba, РЗЭ, формированию монацита-(Ce) и большого объема ниобий-содержащих гидроксидов железа в коре выветривания.

5. Геохимические и изотопные характеристики пород Чуктуконского массива указывают на то, что первичные расплавы образовались в результате частичного плавления умеренно деплетированного гранат-содержащего карбонатизированного мантийного источника под Сибирским кратоном.

### Список основных опубликованных работ автора по теме диссертации:

Статьи в журналах:

1. **Чеботарев Д.А.**, Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В., Пономарчук А.В., Юдин Д.С., Сергеев С.А. (2017) Геохронология Чуктуконского карбонатитового массива, Чадобецкое поднятие, Красноярский край, Россия. *Геология и геофизика*, т. 58, No.10, с. 1542-1553.
2. **Chebotarev D.A.**, Doroshkevich A.G., Klemd R., Karmanov N.S. Evolution of Nb-mineralization in Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland (Krasnoyarsk territory, Russia). (2017) *Periodico di Mineralogia*, v. 86, p. 99-118.
3. Doroshkevich A.G., **Chebotarev D.A.**, Sharygin V.V., Prokopyev I.R., Nikolenko A.M. Petrology of alkaline silicate rocks and carbonatites of the Chuktukon massif, Chadobets upland, Russia: Sources, evolution and relation to the Triassic Siberian LIP. (2019) Стр. 245-260. *Lithos* <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.006>

Тезисы совещаний и конференций

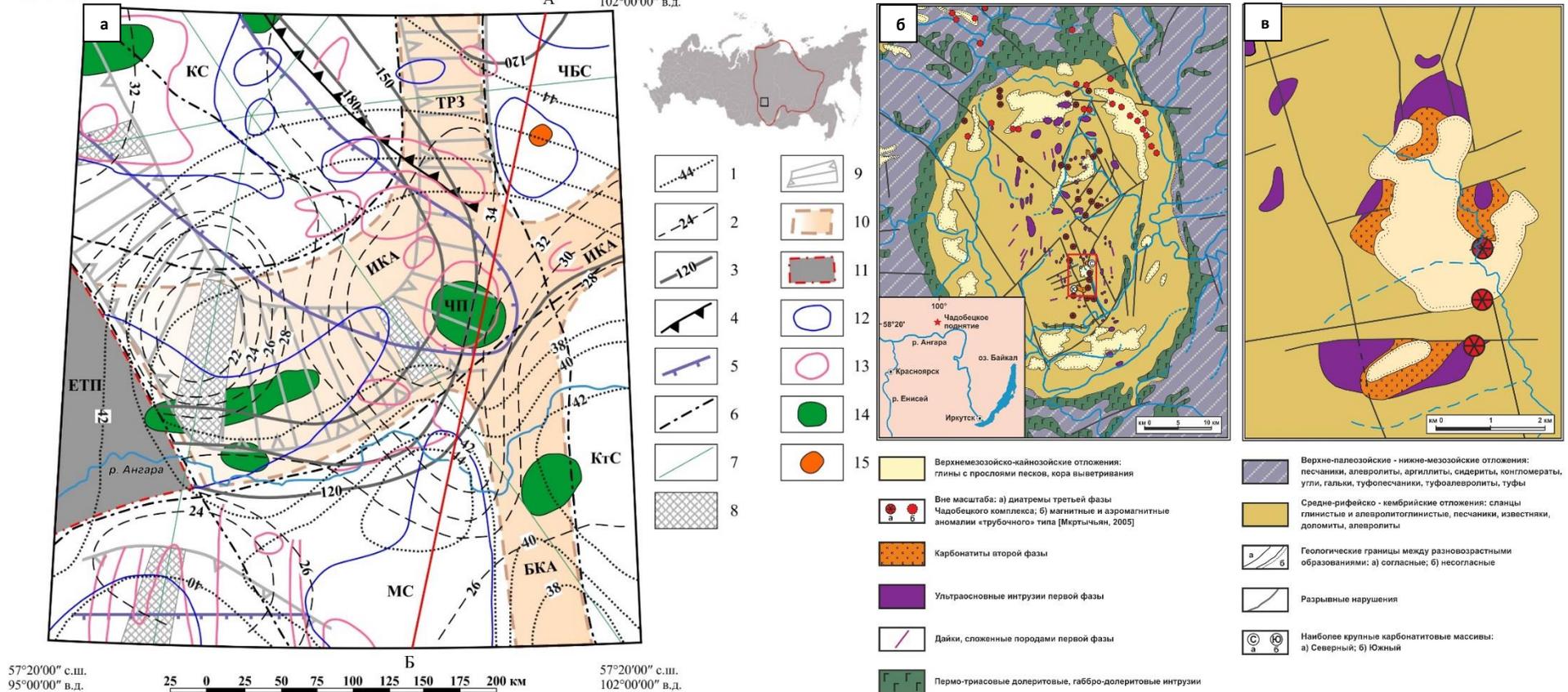
1. Дорошкевич А.Г., **Чеботарев Д.А.**, Шарыгин В.В., Прокопьев И.Р., Николенко А.М. Щелочной магматизм Чуктуконского массива, Чадобецкое поднятие: источники вещества, эволюция магм и связь с триасовой Сибирской изверженной провинцией // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 10. Материалы X Всероссийской петрографической конференции с международным участием. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2018. – 471 с.
2. **Chebotarev D.A.**, Doroshkevich A.G., Sharygin V.V. Evolution and formation conditions for pyrochlore-supergroup minerals of Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland (Krasnoyarsk territory, Russia). // Proceedings of 34th International Conference “Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits”. 4-9 August 2017, Miass, Russia, p. 47-50. <http://magmas-and-metals.ru/file:20151>
3. **Chebotarev D. A.**, Doroshkevich A.G., Sharygin V.V. Pyrochlore-supergroup minerals of Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland (Krasnoyarsk territory, Russia). // Proceedings of 11th “L.L. Perchuk International School of Earth Sciences (I.S.E.S.-2017)”, 3-7 August 2017, Miass, Russia, p. 16.
4. **Chebotarev D.A.**, «Compositional and internal structure features of pyrochlores from carbonatites of the Chuktukon carbonatite complex» // Moscow International School of Earth Sciences – 2016. Abstracts of International conference. 23-28 May/ Editor-in-chief L.N. Kogarko. – М.: GEOKHI RAS, 2016. 136 p.
5. Шарыгин В.В., Дорошкевич А.Г., **Чеботарев Д.А.** (2016) Na-Sr-Ba-REE-карбонаты и фосфаты в минералах карбонатитов Чуктуконского массива, Чадобецкое поднятие, Красноярский край. // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии, посвященной 80-летию со

дня рождения д-ра геол.-минерал. наук Феликса Григорьевича Рейфа (1936-2008). -Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, с.180-182.

6. Doroshkevich A.G., **Chebotarev D.A.**, Sharygin V.V., «Alkaline ultrabasic carbonatitic magmatism of the Chadobets upland» // Moscow International School of Earth Sciences – 2016. Abstracts of International conference. 23-28 May. Editor-in-chief L.N. Kogarko. – М.: GEOKHI RAS, 2016. 136 p.
7. **Чеботарев Д.А.**, Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В. Ниобиевая минерализация в карбонатитах Чуктуконского массива, Чадобецкое поднятие, Красноярский край. Щелочной магматизм земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов. Школа "Щелочной магматизм земли" Москва, 27 мая 2016 г. Труды XXXIII Международной конференции. Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии Наук (ГЕОХИ РАН); Ответственный редактор Л.Н. Когарко. 2016. Стр. 143-146

61°20'00" с.ш.  
95°00'00" в.д.

61°20'00" с.ш.  
102°00'00" в.д.



57°20'00" с.ш.  
95°00'00" в.д.

57°20'00" с.ш.  
102°00'00" в.д.

Рисунок 1. а - Схема элементов строения и физических свойств литосферы юго-западной части Сибирской платформы согласно Дашкевич Н.Н. (1999): 1 – Изогипсы поверхности Мохоровичича; 2 – Изогипсы поверхности гранулит-базитового слоя; 3 – Изогипсы кровли астеносферы; 4 – границы проводящей астеносферы; 5 – региональные зоны высокой проводимости в земной коре: Камовская на севере, Чуно-Бирюсинская на юге; 6 – Крупнейшие структурообразующие и магмоконтролирующие глубинные разломы; 7 – Профили ГСЗ-МОВЗ (НПО Нефтегеофизика); 8, 9 – Участки сложного строения переходной зоны между земной корой и мантией (зоны «корово-мантийной смеси»): 8 – выделенные по материалам и ГСЗ, 9 – прогнозируемые; 10 – Границы рифтогенных структур (авлакогены, зоны тектоно-магматической активизации): ИКА – Иркинеево-Катангский авлакоген, БКА – Братско-Ковинский авлакоген, ТРЗ – Тунгусская рифтогенная зона; 11 – ЕТП – Енисейский тектонический пояс; 12 – Поднятия поверхности фундамента; 13 – Положительные структуры средне- и верхнепротерозойских отложений; 14 – Промежуточные очаги ультраосновного магматизма (ЧП – Чадобецкое поднятие); 15 – Ареалы тел карбонатитов на земной поверхности. Своды: КС – Камовский свод, ЧБС – Чуно-Бирюсинский свод, КтС – Катанский свод, МС – Мурский свод. Линия АБ – линия разреза для рисунка 5.1.

Схема геологического строения Чадобецкого поднятия (А) и Чуктуконского массива (Б) по Дашкевич Н.Н. (1999), Кириченко В.Т. и др. (2012), Каргин А.В. и др. (2016).

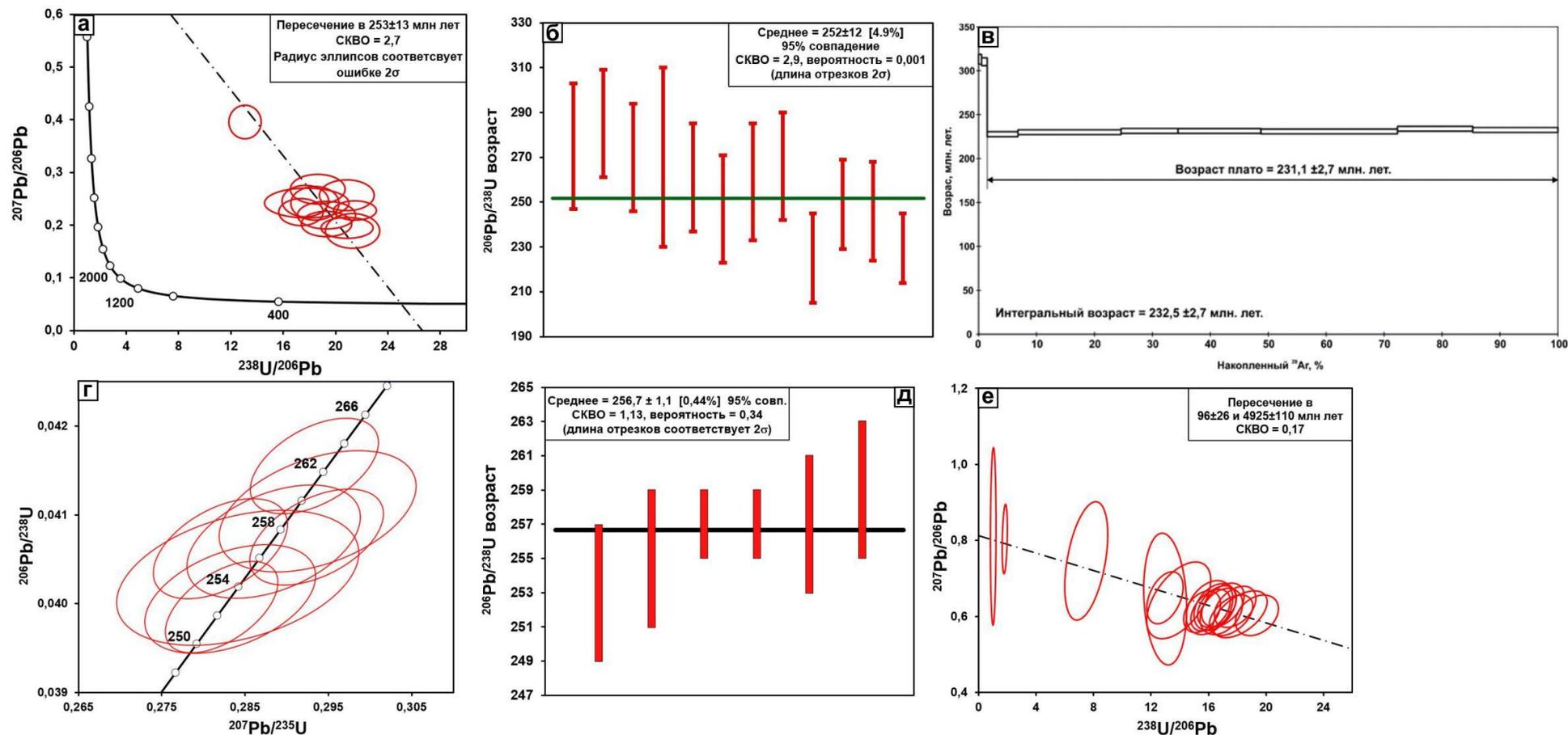


Рисунок 2. а - график конкордии в координатах Тера-Вассербурга с нанесенными нескорректированными на обыкновенный свинец отношениями  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  и  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  в перовскитах из айлицитов; б - средневзвешенный  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возраст перовскита из айлицитов; в - возрастной  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  спектр для риппита из карбонатитов; г – диаграмма с конкордией для циркона из дамтьернитов д - средневзвешенный  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возраста циркона из дамтьернитов; е - график в координатах Тера-Вассербурга для монацита из коры выветривания по карбонатитам.

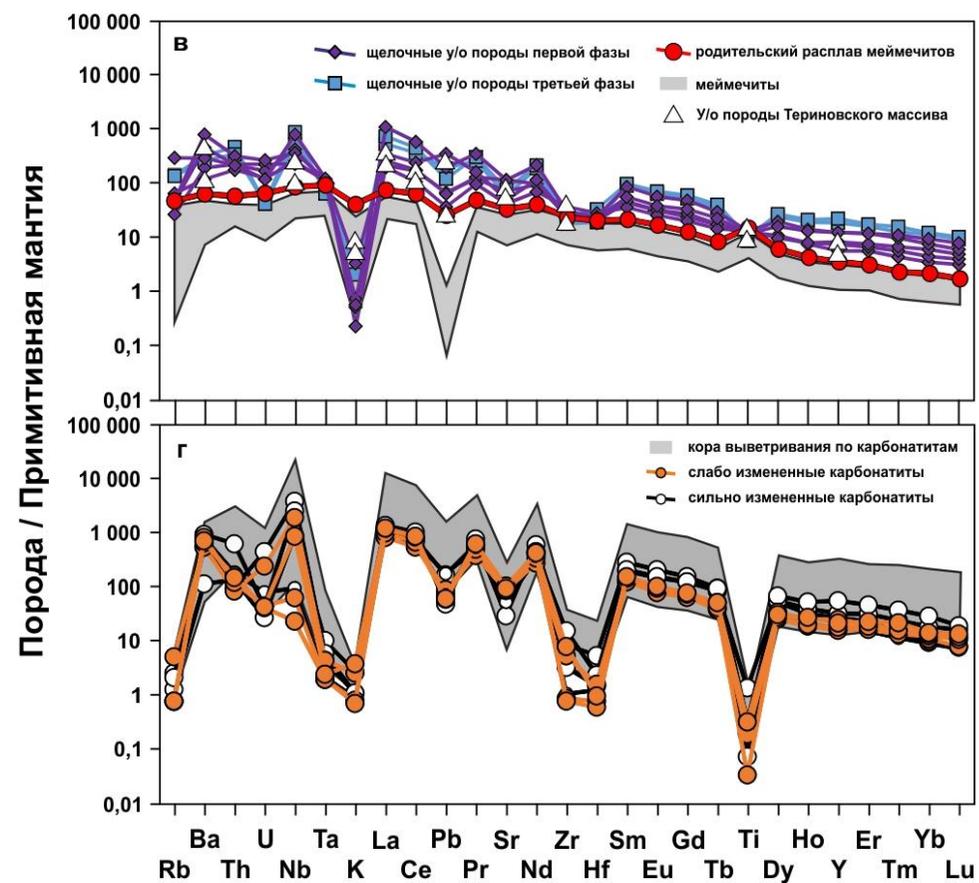
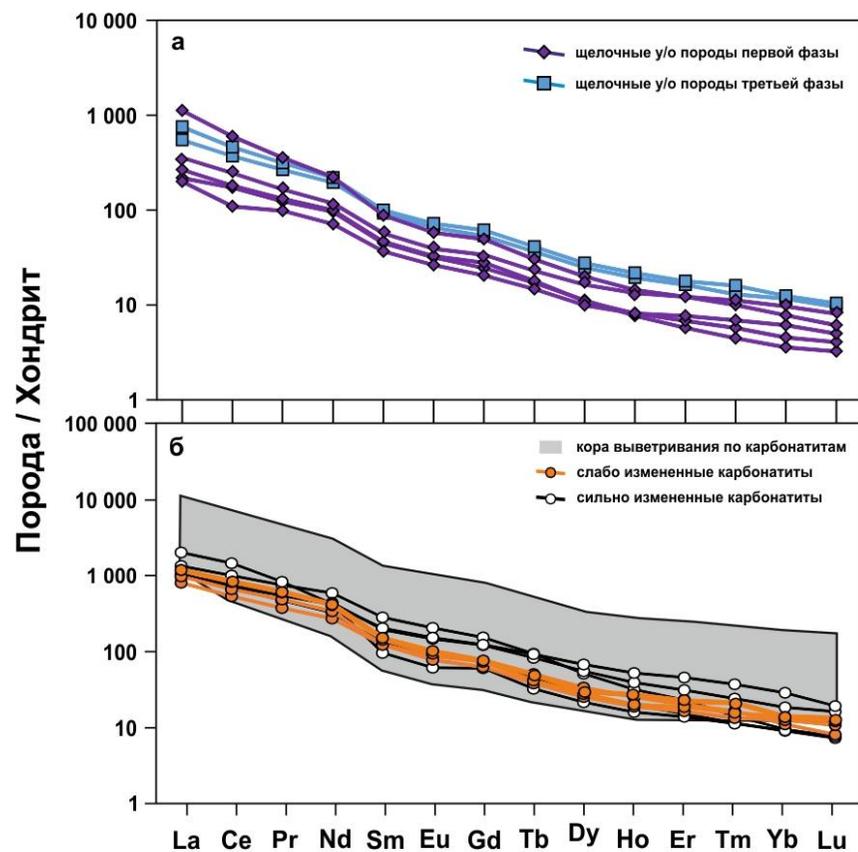


Рисунок 3. Спектр распределения РЗЭ и редких элементов, нормированных к хондриту и примитивной мантии для пород Чуктуконского массива. Для сравнения приведены данные по ультраосновным породам Териновского массива (Лапин и Пятенко, 1992; Лапин, 2001), меймечитам (Васильев и др., 2017) и рассчитанному родительскому расплаву меймечитов (Sobolev et al., 2009). Значения для хондрита и примитивной мантии из Sun S.S. и McDonough M.F. (1989).

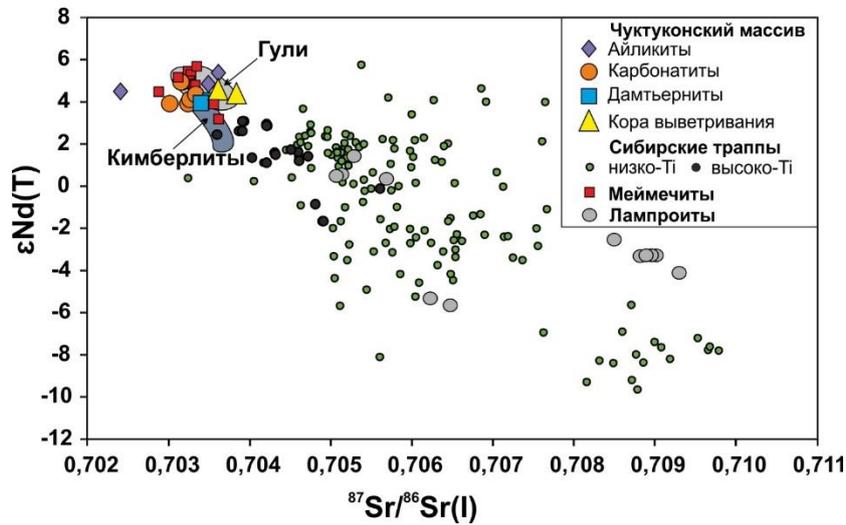


Рисунок 4. График  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (I) и  $\epsilon\text{Nd}(T)$  пород Чуктуконского массива в сравнении с Сибирскими траппами (Sharma et al., 1991, 1992; Wooden et al., 1993; Lighfood et al., 1993; Arndt et al., 1998; Fedorenko et al., 2000; Carlson et al., 2006; Ivanov et al., 2018), породами Гулинского массива (Kogarko and Zartman, 2011) и триасовыми кимберлитами и лампроитами Далдын-Алакитского кимберлитового поля (Carlson et al., 2006; Sun et al., 2014; Васюкова, 2017; Vrublevskii et al., 2005).

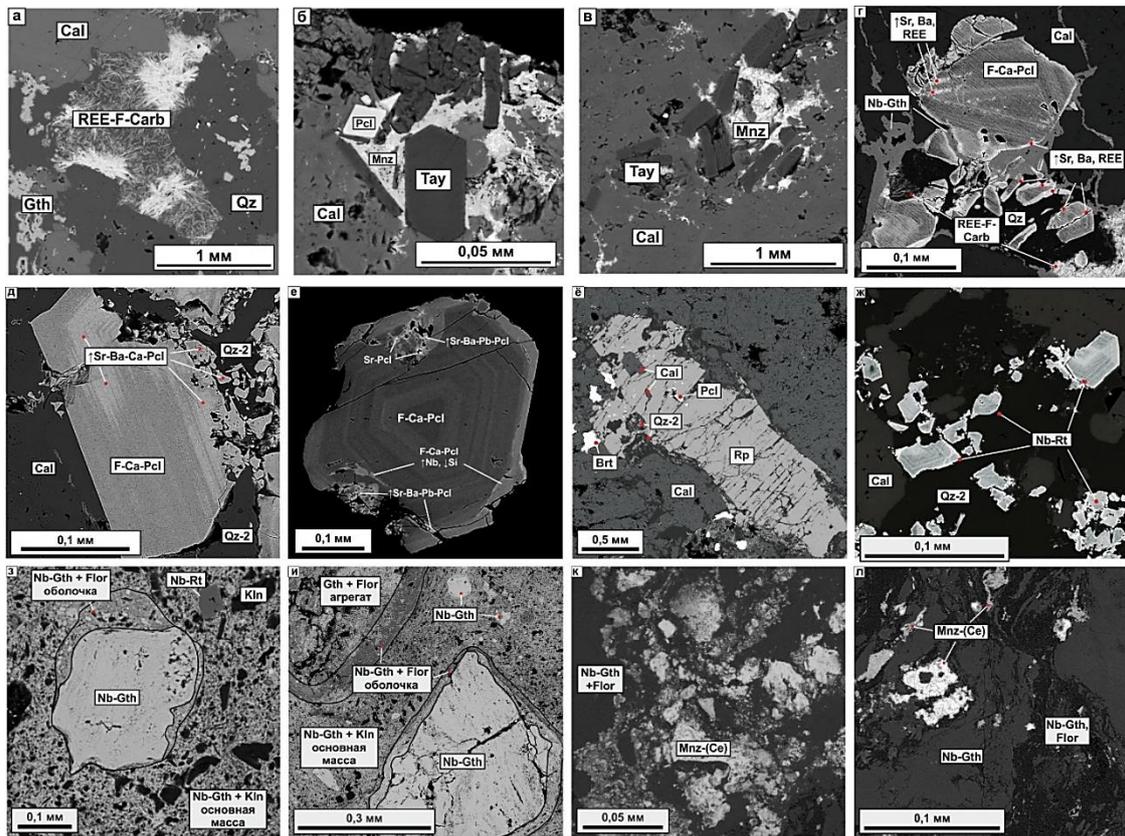


Рисунок 5. а – прожилок гидротермального кварца с фторкарбонатами редких земель и гетитом в кальците. б, в – включения кристаллических агрегатов тайниолита и монацита в кальците; в - части кристаллов пирохлора на контакте с гидротермальным кварцем (Qz-2) имеют кайму изменения и неоднородную зональность (светлые оттенки), в отличие от участков, контактирующих с кальцитом (Cal); г – часть кристалла пирохлора, контактирующая с гидротермальным кварцем, проявляет текстуры дробления и растворения, в то время как часть, контактирующая с кальцитом ровная и ограненная; д - сильно измененные кристаллы пирохлора в гидротермально-измененных частях карбонатитов; е - изображение кристалла рипшита в кварц-кальцитовой матрице; ж - корродированный зональный Nb-рутил в кварцевом прожилке; з, и - кора выветривания зоны бурых железняков и охр; к, л - гетит из зоны выщелачивания коры выветривания.

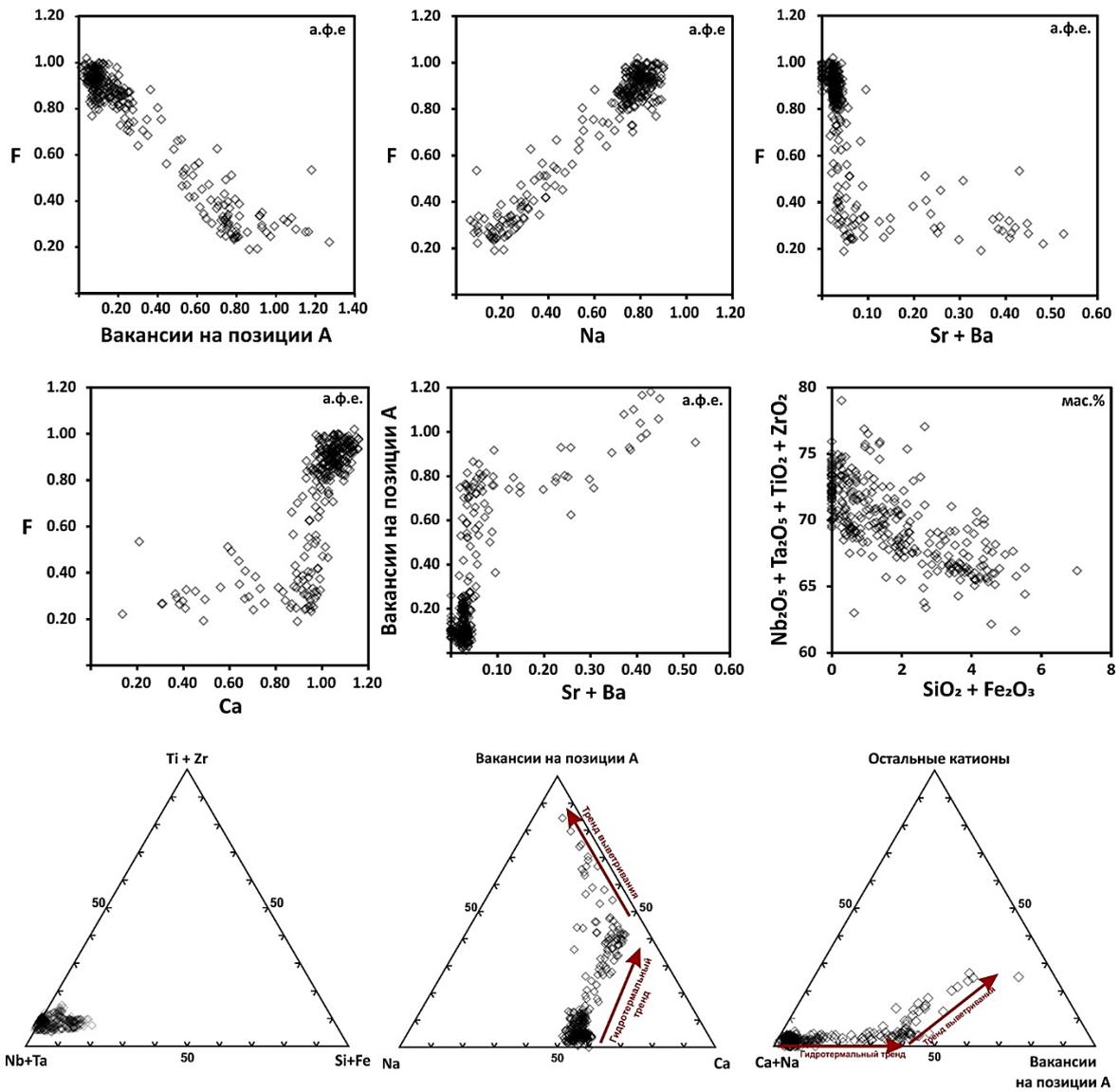


Рисунок 6. Вариации состава катионов на позициях А (а.ф.е) и В (вес. %) в пироклорах из карбонатитов.

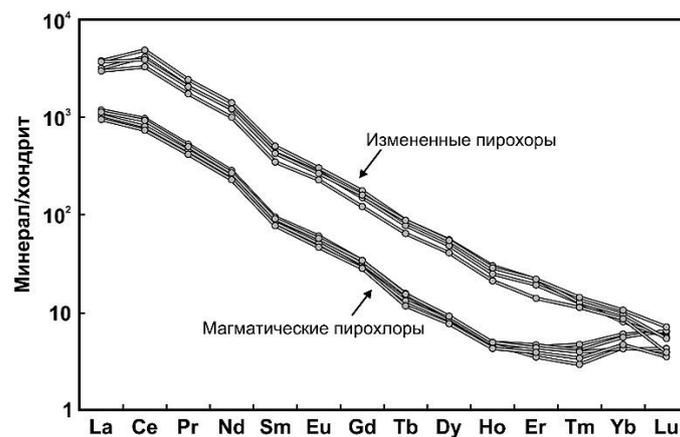


Рисунок 7. Содержание РЗЭ в пироклорах, нормированные к хондриту. Значения хондрита согласно Sun S.S., McDonough W.F. (1989).