

на правах рукописи



Фомина Екатерина Николаевна

**РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ КАРБОНАТИТЫ МАССИВА
ВУОРИЯРВИ
(КОЛЬСКАЯ ЩЕЛОЧНАЯ ПРОВИНЦИЯ):
ПЕТРОЛОГИЯ И РУДОГЕНЕЗ**

Специальности:

1.6.3 – Петрология, вулканология;

*1.6.10 – Геология, поиски и разведка твердых полезных
ископаемых, минерагения*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск

2023

Работа выполнена в Геологическом институте – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Кольский научный центр Российской академии наук", г. Апатиты.

Научный руководитель:

Арзамасцев Андрей Александрович, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (ИГГД РАН), ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Никифоров Анатолий Викторович, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), ведущий научный сотрудник

Избродин Иван Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт геологии и минералогии Сибирского отделения РАН (ИГМ СО РАН), старший научный сотрудник

Ведущая организация:

ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), г. Москва

Защита состоится «15» марта 2023 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 (Д 003.067.03) при Федеральном государственном бюджетной учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С.Соболева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovetu>.

Отзывы направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3, ИГМ СО РАН. Факс: +7 (383) 333-27-92. Электронная почта: turkina@igm.nsc.ru.

Автореферат разослан «10» февраля 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.050.01 (Д 003.067.03), доктор геол.-мин. наук



/О.М.Туркина/

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Редкоземельные элементы (РЗЭ) являются основным стратегическим сырьем, имеющим критическое значение для многих отраслей промышленности. Они требуются для создания современных высокотехнологичных устройств, необходимы для "зеленой" регенеративной энергетики и широко используются в гражданской и военной промышленности. Ввиду высокой востребованности РЗЭ в современной жизни спрос на них в последние десятилетия резко возрос, что привело к усилению внимания мирового научного сообщества к исследованию источников и условий образования месторождений этих элементов. В настоящее время основные мировые запасы РЗЭ сосредоточены в Китае, Вьетнаме, Бразилии, России, Индии, Австралии, Гренландии и США, причем Китай, обладающий одной третью мировых запасов РЗЭ, является мировым лидером по разведке и добыче (около 95% от общемировой добычи) этих полезных ископаемых и контролирует глобальный рынок редкоземельного сырья. В России балансовые запасы РЗЭ, посчитанные для 16 месторождений различного типа, составляют около 18% от общемировых ([U.S. Geological Survey, 2021](#)), однако добыча ведётся лишь на Ловозерском месторождении лопаритовых руд. В настоящее время в «Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года» РЗЭ рассматриваются в качестве «...дефицитных полезных ископаемых, внутреннее потребление которых в значительной степени обеспечивается вынужденным импортом и(или) складированными запасами», что является неблагоприятным для экономики РФ и затрудняет переход к новому технологическому циклу.

Большинство крупнейших в мире месторождений РЗЭ локализовано в щелочно-карбонатитовых комплексах, которые не имеют весомых конкурентов среди геологических объектов других типов. Для карбонатитов характерны высокие концентрации РЗЭ, ниобия и ряда других редких металлов. Благодаря этому карбонатиты и продукты их гипергенного выветривания являются главными источниками редких земель и ниобия для мировой промышленности. Основной объём РЗЭ сосредоточен в собственно редкоземельных карбонатитах, являющихся весьма редкими породами, образованными на поздних стадиях карбонатитогенеза и обычно занимающими резко подчиненное положение относительно других пород комплексов ([Goodenough et al., 2018](#); [Wall, 2013](#)). Малая распространённость данных пород и многостадийность их формирования препятствуют построению для них единой петрогенетической модели и выявлению факторов, способствовавших рудоконцентрированию. Помимо того, ввиду своеобразной петрохимической специфики и сложной эволюции, редкоземельные карбонатиты характеризуются широким (нередко

уникальным) разнообразием слагающих их минеральных фаз. В связи с этим проведение комплексного геологического изучения редкоземельных карбонатитов каждого нового проявления с применением современных методик исследования является весьма актуальной научной задачей, представляющей чрезвычайно важное значение как для фундаментальной, так и для прикладной сферы геологии.

В состав Кольской щелочной провинции входит множество щелочно-ультраосновных комплексов с карбонатитами, и в некоторых из них зафиксирована редкоземельная минерализация. Однако степень изученности в них карбонатитовых образований, в особенности редкоземельных, довольно низка, в связи с чем в Кольском регионе не производилось и экономической оценки связанного с карбонатитами редкоземельного оруденения. В настоящей диссертационной работе рассмотрен один из наиболее перспективных [согласно Б.В. Афанасьеву (2011)] на РЗЭ карбонатитовых объектов Кольского региона.

Цели и задачи исследования. Цель работы состояла в определении источников вещества и реконструкции стадий образования редкоземельных карбонатитов массива Вуориярви, оценке характера флюидной переработки этих пород и выявлении главных факторов накопления и перераспределения в них редкоземельных элементов. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) Изучение геологического строения карбонатитовых тел массива Вуориярви;

2) Петрографо-минералогическая и геохимическая характеристика редкоземельных карбонатитов и комплементарных им пород массива для установления основных разновидностей карбонатитов и стадийности их становления;

2) Выявление минералогических, геохимических и изотопно-геохимических индикаторов хода эволюции карбонатитов путём сопоставления результатов комплекса современных методов исследования;

3) Определение химических и температурных параметров флюидного режима на различных стадиях формирования пород путём рамановского и термометрического изучения флюидных включений;

4) Оценка привноса-выноса компонентов в ходе метасоматических преобразований для определения их масштаба и направленности процессов;

5) Создание генетической модели формирования редкоземельных карбонатитов массива.

Объект исследования. В качестве объекта исследования выступили карбонатиты участка Петяйян-Вара щелочно-ультраосновного карбонатитового массива Вуориярви.

Фактический материал, методы исследования и личный вклад автора. В основу диссертационной работы легла коллекция образцов карбонатитов, отобранных автором в ходе полевых работ на массиве Вуориярви в 2015–2020 гг. Коллекция включает более 100 образцов карбонатитов и вмещающих их силикатных пород участков Петайян-Вара и Неске-Вара. При решении поставленных задач автором был использован комплекс методов. Изучено более 200 петрографических шлифов, аншлифов и полированных пластинок (при помощи микроскопа Axioplan 2 Imaging и бинокляров ZEISS Stemi 2000 и Альтами CM0870-T, ГИ КНЦ РАН); собрано более 300 рамановских спектров минералов (с использованием спектрометра Jobin-Yvon LabRam HR800, РЦ «Геомодель» СПбГУ); определено 230 химических составов минералов (методами EDS, Oxford X-Max 20 в РЦ «Геомодель» СПбГУ и WDS, Cameca MS 46 в ГИ КНЦ РАН); в 10 препаратах выполнено исследование методом дифракции отражённых электронов (EBSD, при помощи сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N, оборудованного детектором Oxford HKLNordlys EBSD, РЦ «Геомодель» СПбГУ). Для 46 валовых проб карбонатитов проведены анализы содержания петрогенных компонентов (методами мокрой химии, ГИ КНЦ РАН), сняты дифрактограммы (с помощью дифрактометра RigakuMiniFlex II, РЦ "Рентгенодифракционные методы исследования" СПбГУ), выполнены анализы концентрации редких элементов (методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре ELAN 9000 DRC-e, ИХТРЭМС КНЦ РАН) и изучен изотопный состав углерода и кислорода (с использованием автосамплера Finnigan MAT GasBench II и масс-спектрометра Delta V Advantage ThermoFisher, ГИН РАН). Для 26 проб карбонатитов проведены изотопные исследования Rb, Sr, Sm и Nd (при помощи многоколлекторного масс-спектрометра Triton, ThermoFisher, ИГГД РАН). В 8 образцах карбонатитов исследованы флюидные включения в минералах (при помощи поляризационного микроскопа Olympus BX51, рамановского спектрометра LabRam HR800 Horiba Jobin Yvon и столика Linkam THMSG-600, ЦКП МИИ СО РАН). На основе комбинированного массива данных (содержания и петрогенных, и редких элементов, а также рентгеновские дифрактограммы для валовых проб) по 43 образцам карбонатитов проведен факторный анализ (расчеты проводились в программном пакете IBM SPSS Statistics v.23). По этим же пробам проведены масс-балансовые расчеты (изоконный анализ) перераспределения элементов между породами в ходе метасоматических процессов (с использованием программного пакета GeoIso).

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в экспедиционных работах; первичной подготовке каменного материала (изготовлении петрографических шлифов, аншлифов и навесок для

геохимических и изотопных исследований); петрографическом описании образцов; проведении рамановских, EBSD и микронзондовых исследований; выполнении статистического и масс-балансового (изоконного) анализа с разработкой оригинальных методик; обработке полученных минералогических, геохимических и изотопных данных; анализе, интерпретации и опубликовании всех полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 190 страниц (без учёта приложения) состоит из титульного листа, оглавления, введения, 7 глав, заключения и списка литературных источников из 413 наименований. В работе содержится 43 рисунка, 11 таблиц и одно приложение (3 таблицы).

Защищаемые положения:

1. *Бурбанкитсодержащие карбонатиты участка Петяйян-Вара образовались в результате внедрения карбонатитового расплава с высокими концентрациями редкоземельных элементов, бария и стронция. Данные породы претерпели две стадии метасоматических преобразований: главную стадию концентрирования и рудоотложения РЗЭ, в течение которой сформировались карбонатиты, богатые баритом и анкилитом, и стадию разубоживания редкоземельных руд, в ходе которой возникли карбонатиты с бастнезитом и стронцианитом.*

2. *Формирование анкилитовых руд Вуориярви протекало под влиянием высококонцентрированного флюида, состав которого эволюционировал от сульфатного до карбонатного на фоне снижения температуры от 350 °С до 250 °С. Образование бастнезитовых руд происходило при температуре 100 °С – 250 °С при участии низкоконцентрированного флюида, состав которого эволюционировал от хлорид-гидрокарбонатного до хлоридного.*

3. *Карбонатитовый расплав был продуктом изотопно деплетированного мантийного источника и не был контаминирован коровым веществом. Анкилитовые карбонатиты образовались непосредственно после карбонатитового магматизма под воздействием смеси корового и ортомагматического флюидов. Формирование бастнезитовых руд стало следствием поздней переработки анкилитовых карбонатитов флюидом корового происхождения.*

Научная новизна. Получены принципиально новые сведения о минералогии и геохимии уникальной ассоциации практически значимых редкоземельных карбонатитов, выявлены петрологические и минералогические индикаторы их образования и эволюции, определено место редкоземельного оруденения в общей истории становления карбонатитов массива Вуориярви, установлены механизмы концентрирования

редкоземельных элементов в ходе магматического процесса и на позднемагматических стадиях преобразования пород.

Практическая и теоретическая значимость работы. Разработана петрогенетическая модель для редкоземельных карбонатитов массива Вуориярви и определены условия рудогенеза на разных этапах эволюции магматической системы и последующих постмагматических преобразований пород. Установлен механизм формирования таких руд, определяющий структурный контроль разных типов минерализации РЗЭ, что способствует подбору эффективных поисковых инструментов как при разведке в пределах массива Вуориярви, так и при поиске схожих объектов в мире. Разработаны и апробированы оригинальные авторские методики статистического сопоставления рентгеновских и геохимических данных и масс-баланса комплементарных метасоматических процессов, которые могут быть применены на широком спектре геологических объектов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 статьях из списка ВАК, а также в материалах и трудах (в том числе рецензируемых) международных и российских конференций. Промежуточные результаты по материалам исследования представлялись автором в виде устных докладов на 6 международных конференциях: «Щелочной магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов» (Миасс, 2017 г., Москва, 2018 г. и Санкт-Петербург, 2019 г.); «16-я европейская конференция по порошковой дифракции – EPDIC-16» (Эдинбург, Великобритания, 2018 г.); «Генеральная ассамблея Европейского союза геонаук – EGU-2020» (Вена, Австрия, 2021); «Goldschmidt-2021» (Лион, Франция, 2021).

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю А.А. Арзамасцеву за направление на увлекательный путь исследования щелочного магматизма, а также многочисленные мудрые рекомендации и научное руководство. Все этапы исследования в рамках диссертации, от полевых работ и пробоподготовки до дискуссии и совместных публикаций, проводились в тесном сотрудничестве с Е.Н. Козловым и М.Ю. Сидоровым, которым автор выражает свою сердечную благодарность. Низкий поклон за неугасающий интерес к исследованиям автора, бесчисленные ценные советы, идеи и наставления Н.В. Владыкину и К.И. Лохову.

При проведении полевых работ неоценимое содействие оказали М.Г. Дёмкин, О.В. Казанов, В.В. Киркин, И.А. Коваль, А.А. Компанченко, П.А. Маурчев, А.А. Пестриков, С.В. Петров, В.В. Пуха, А.А. Стафоркин, Д.А. Чеботарёв и А.В. Чернявский. Также автор премного благодарна

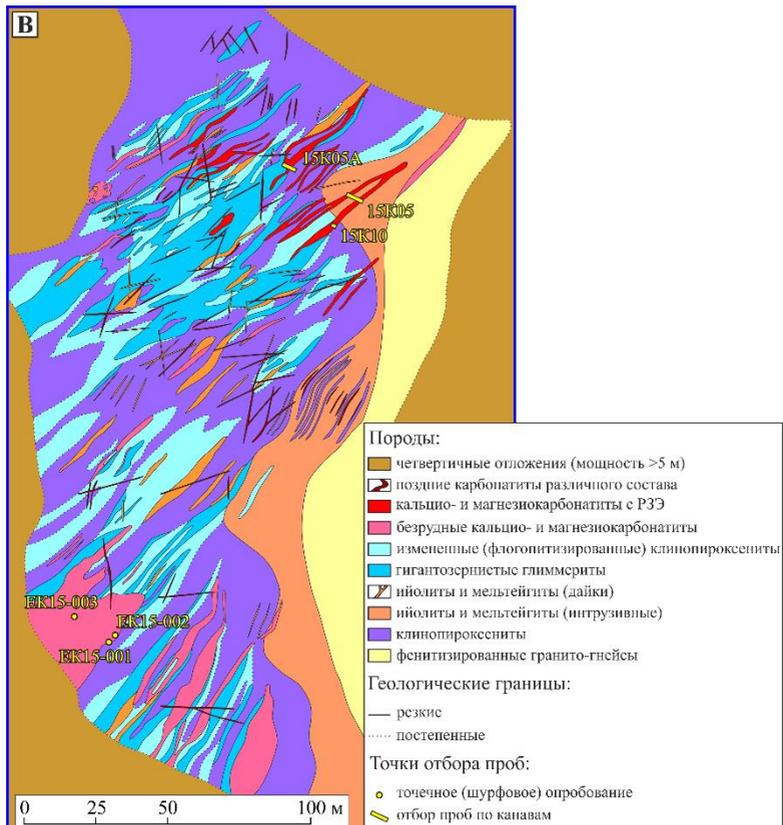
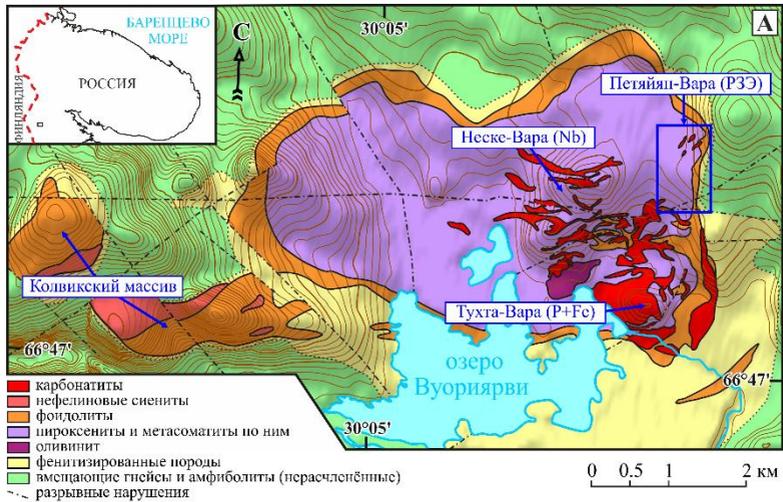
сотрудникам лаборатории № 48 и отдела «Шлифовальная мастерская» ГИ КНЦ РАН за первичную подготовку материала для изучения; коллективу лаборатории № 33 ГИ КНЦ РАН за химические анализы пород; И.Р. Елизаровой (ИППЭС КНЦ РАН) за определения редких элементов методом ICP-MS; аналитикам В.В. Бочарову, Н.В. Власенко и В.В. Шиловских (РЦ «Геомодель»), А.В. Базай (ГИ КНЦ РАН) и Е.А. Селивановой (ГИ КНЦ РАН) за помощь в минералогических исследованиях; Б.Г. Покровскому (ГИН РАН) за определения изотопного состава С и О; Е.С. Богомолу (ИГГД РАН) за Sm–Nd и Rb–Sr изотопный анализ; А.Г. Дорошкевич, И.Р. Прокофьеву (ИГМ СО РАН) и М.Г. Дёмкину (МГУ) за исследования флюидных включений; и Д.Д. Мыце (СПбГУ) за рентгеноструктурный анализ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекты РНФ № 19-77-10039 и № 19-77-10039-П «Механизм образования поздних редкометалльных (РЗЭ, Nb) карбонатитов: от магмогенерации до гипергенеза»).

ГЕОЛОГИЯ ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНОГО КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА ВУОРИЯРВИ

Щелочно-ультраосновной карбонатитовый массив Вуориярви (Кольский регион, Россия) является одним из более чем 20 щелочных комплексов девонской Кольской щелочной провинции (Кухаренко и др., 1965; Bulakh *et al.*, 2004; Downes *et al.*, 2005). Большая часть массива (~12 км²) сложена породами первых магматических фаз – пироксенитами с подчиненным количеством более ранних оливинитов и перидотитов. Краевая часть состоит из щелочных пород ийолит-мельтейгитового ряда, а на юго-западе, в пределах Колвикского массива-сателлита, с полевошпатовыми разновидностями этих пород ассоциируют нефелиновые сиениты (Рис. 1А). Самые молодые образования магматической стадии, фоскориты и карбонатиты, занимают секущее положение по отношению ко всем остальным породам.

Рис. 1. (А) Геологическая карта щелочно-ультраосновного карбонатитового массива Вуориярви [по (Афанасьев, 2011) с упрощениями]. Стрелками указаны участки карбонатитов Тухта-Вара, Неске-Вара, Петяйян-Вара, а также Колвикский агпаитовый нефелин-сиенитовый массив-сателлит. На врезке показано положение комплекса Вуориярви в Кольском регионе (северо-запад России). (В) Геологическая схема участка Петяйян-Вара (Плиев и Сараханов, 1965). Контур схемы (В) соответствует прямоугольнику на карте (А). Иллюстрация из работы (Fomina and Kozlov, 2021).



Карбонатиты занимают около 8 % площади массива и сосредоточены преимущественно в его юго-восточной части. Выделяют четыре участка карбонатитов с различной рудной специализацией – Тухта-Вара, Неске-Вара, Петяйян-Вара и Нама-Вара (последнее – вне самого массива в 8 км к востоку, где карбонатиты прорывают докембрийские гранито-гнейсы и амфиболиты фундамента).

Среди карбонатитов Вуориярви в целом преобладают ранние кальциокарбонатиты, сложенные преимущественно кальцитом и наиболее распространённые на участках Неске-Вара и Тухта-Вара (Капустин, 1975, 1971; Кухаренко и др., 1965). Эти образования традиционно подразделяются на две стадии (Капустин, 1971). К первой стадии относят линейные и штокообразные тела с такситовой структурой и выраженной зональностью, локализованные в крупных зонах дробления и сложенные кальцитом (60–80 об.%), апатитом (5–10 об.%), флогопитом (5–15 об.%), пироксеном (до 10 об.%) и магнетитом (до 15 об.%). Ко второй стадии причисляют более распространённые конически-кольцевые жилы крупнозернистых пород, на 60–90 об.% состоящих из кальцита и непременно содержащих 10–30 об.% апатита и аксессуарные магнетит, пироклор и бадделейт/циркон. С кальциокарбонатитами и ассоциирующими с ними фоскоритами связаны разведанные месторождения апатит-магнетит-бадделейтовых руд Тухту-Вары и пироклоровых руд Неске-Вары.

Поздние карбонатиты в массиве Вуориярви являются значительно менее распространёнными породами (Капустин, 1971; Кухаренко и др., 1965), представленными жилами магнезио- (доломитовых), ферро- (сидеритовых и анкеритовых), силикокарбонатитов (с кварцем или полевыми шпатами) и поздних кальциокарбонатитов, иногда с высоким содержанием Ва, Sr, PЗЭ, Ti и Nb. Редкоземельные минералы, связанные в пределах комплекса именно с поздними карбонатитами, были зафиксированы во всех карбонатитовых участках Вуориярви: в Нама- и Тухта-Варе – в аксессуарных количествах, а в Неске- и Петяйян-Варе – вплоть до образования собственно редкоземельных карбонатитов. Однако объёмы последних среди карбонатитов Неске-Вары в целом весьма невелики (Афанасьев и Михэлис, 1984). Именно поэтому участок Петяйян-Вара, где редкоземельные карбонатиты распространены широко, представляется наиболее подходящим объектом для изучения этого типа пород.

Участок Петяйян-Вара находится в северо-восточной части массива в пределах одноимённой возвышенности. В пределах участка присутствуют пироксениты, ийолиты, глиммериты, небольшой объём фенитов из зоны контакта со вмещающими архейскими гнейсами, а также секущие все прочие породы (кроме фенитов) жилы и линзы магнезиокарбонатитов длиной от нескольких десятков до 320 метров и мощностью от нескольких сантиметров до 5–6 (реже 20) метров (Рис. 1В).

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. *Бурбанкитсодержащие карбонаты участка Петяйян-Вара образовались в результате внедрения карбонатитового расплава с высокими концентрациями редкоземельных элементов, бария и стронция. Данные породы претерпели две стадии метасоматических преобразований: главную стадию концентрирования и рудоотложения РЗЭ, в течение которой сформировались карбонаты, богатые баритом и анкилитом, и стадию разубоживания редкоземельных руд, в ходе которой возникли карбонаты с бастнезитом и стронцианитом.*

Петрографо-минералогическая характеристика карбонатитов участка Петяйян-Вара. По результатам исследования среди изученных карбонатитов было выделено девять разновидностей пород, составляющих три последовательно сформировавшиеся группы.

Группа ранних карбонатитов:

- 1) «Бурбанкитсодержащие карбонаты» – светло-жёлтые среднезернистые магнезиокарбонаты с крупными (диаметром первые см) псевдоморфозами по бурбанкиту, а также бурбанкитовыми и кальцитовыми включениями в доломите, что указывает на их магматическую природу и обогащение расплава Ba, Sr и РЗЭ ([Chakhmouradian and Dahlgren, 2021](#));
- 2) «Титанистые карбонаты» – обогащенные Ti красно-коричневые мелкозернистые магнезио-, ферро- и силикокарбонаты, сложенные доломитом, микроклином, флогопитом, эгирином, альбитом, кварцем, оксидами Ti и Fe;
- 3) «Апатитизированные карбонаты» – богатые апатитом титанистые и, в редких случаях, бурбанкитсодержащие карбонаты.

Группа Ba-Sr-РЗЭ карбонатитов и родственных им пород:

- 4) «Баритовые карбонаты» – окрашенные в различные оттенки коричневого среднезернистые магнезиокарбонаты с баритовой ассоциацией, минерализация распределена пятнами;
- 5) «Анкилитовые карбонаты» (богаты РЗЭ) – неравномернозернистые красные карбонаты с анкилитовой ассоциацией, минерализация в данных карбонатитах распределена пятнами, прожилками и/или формирует цемент в брекчиях более ранних магнезиокарбонатитов;
- 6) «Кальциокарбонаты» – гигантозернистые анхимономинеральные кальцитовые карбонаты цвета “кофе с молоком”.

Группа поздних карбонатитов:

- 7) «Бастнезитовые карбонаты» (богаты РЗЭ) – неравномернозернистые коричневые брекчии карбонатитов с бастнезит-кварцевым цементом;
- 8) «Стронцианитовые карбонаты» – магнезиокарбонаты с розово-белыми стронцианитовыми жилками и брекчии с цементом того же состава.

Каждой из перечисленных разновидностей пород соответствует своя индивидуальная минеральная ассоциация. В качестве девятой разновидности («гибридных карбонатитов») были выделены породы, сложенные сразу несколькими наложенными друг на друга минеральными ассоциациями. В гибридных карбонатитах есть возможность непосредственно наблюдать микроструктурные взаимоотношения многих исследованных минералов, что способствовало расшифровке последовательности смены минеральных парагенезисов (Рис. 2). Эти наблюдения в сочетании с данными, полученными для других разновидностей карбонатитов Петяйян-Вары, позволяют чётко сформулировать последовательность смены парагенезисов (Рис. 3), привязанной к трем разновозрастным стадиям: (1) магматическому событию, (2) первой и (3) второй стадии метасоматической переработки.

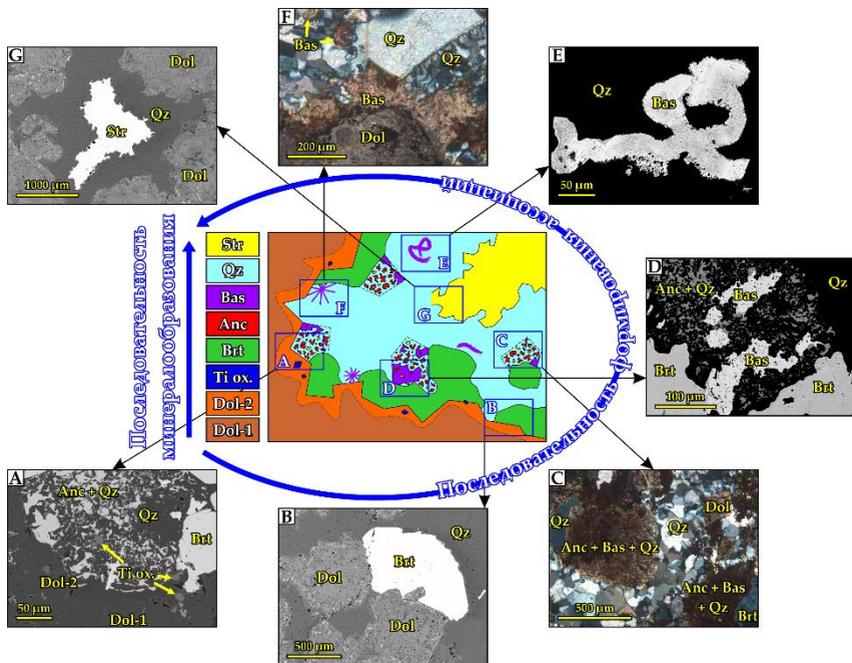


Рис. 2. Последовательность минералообразования в гибридном карбонатите. По центру – зарисовка взаимоотношений минеральных ассоциаций (A)–(G) в структуре породы. (A) Включения оксидов титана (брукита) в каймах Dol-2 вокруг Dol-1. (B) Обрастание доломита баритом. (C) Морфология и (D) строение псевдоморфоз по анкиту. Скопления (E) губчатого и (F) игольчатого бастнезита в кварце. (G) Полость, оставшаяся после кристаллизации кварца, заполненная стронцианитом.

Группа пород	I. Ранние карбонатиты Магматическая и ранняя постмагматическая стадии			II. Ba-Sr-PЗЭ карбонаты и родственные им породы 1-ая стадия метасоматоза	III. Поздние карбонатиты 2-ая стадия метасоматоза	
Минерал						
Кальцит						
Доломит	Dol-0	Dol-1		Dol-2	Dol-3	
Стронцианит						
Бурбанкит						
Анкилит						
Бастнезит					ОН > F	
Синшинит					ОН > F	
Апатит	Ap-1			Ap-2		
Монацит						
Микроклин						
Альбит						
Эгирин						
Флогопит						
Циркон						
Торит						
Кварц						
Пироклор						
Оксиды Ti						
Оксиды Fe	Mag				Исп	
Барит						
Пирит						
Порода:	(1) Первичные магнезиокарб.	(2) Титанистые карбонатиты	(3) Апатитизиро- ванные участки	(4) Баритовые магнезиокарб.	(5) Анкилитовые магнезиокарб. (6) Кальциокарб.	(7) Бастнезитовые магнезиокарб. (8) Стронцианитовые карб.

Рис. 3. Последовательность образования парагенетических минеральных ассоциаций в карбонатитах Петяйян-Вары.

Геохимия карбонатитов участка Петяйян-Вара. По химическому составу большинство изученных образцов участка является магнезиокарбонатитами, поскольку основным карбонатом в большинстве пород является доломит. Гигантозернистые кальцитовые карбонатиты и некоторые пробы анкилитовых карбонатитов относятся к кальциокарбонатитам. Некоторые образцы титанистых и бастнезитовых карбонатитов по геохимической классификации соответствуют ферро- и силикокарбонатитам, что связано с обилием окислов и гидроокислов железа и присутствием пороодообразующих силикатов. Концентрации редких земель, бария и стронция в карбонатитах Петяйян-Вары в целом высоки (до 8.78 масс.% SrO, до 17.06 масс.% BaO, до 13.92 масс.% PЗЭ₂O₃), но между собой выявленные разновидности карбонатитов в этом аспекте различаются на порядок и более. Наиболее высокими содержаниями PЗЭ₂O₃ обладают анкилитовые (9-14 масс.%) и бастнезитовые (0.8-5 масс.%) карбонатиты.

Установлена корреляция между общим содержанием PЗЭ и La-Yb отношением (Рис. 4), отражающим степень фракционирования PЗЭ. Оба эти параметра возрастают начиная с ранних карбонатитов в сторону анкилитовых карбонатитов, сформировавшихся в первом метасоматическом событии, сопровождавшемся концентрированием PЗЭ.

Преобразование анкилитовых карбонатов в бастнезитовые, произошедшее в ходе второго метасоматического события, привело к снижению обоих рассматриваемых показателей. Таким образом при формировании редкоземельных карбонатов Вуориярви РЗЭ не только перераспределялись, но и многократно фракционировались, причем на первой стадии метасоматоза произошло концентрирование РЗЭ, а на второй – разубоживание ранее накопленных концентраций.

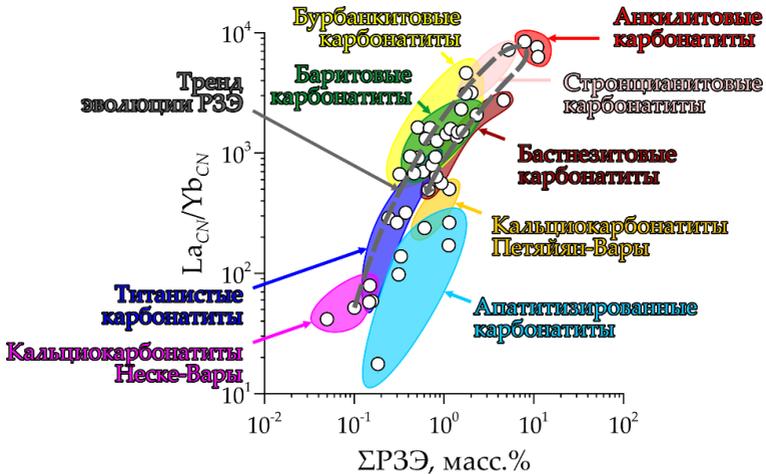


Рис. 4. Зависимость общего содержания РЗЭ (масс.%) от отношения La_{CN}/Yb_{CN} для всех разновидностей карбонатов участка Петяйян-Вара и кальциокарбонатов участка Неске-Вара (массив Вуориярви).

Второе защищаемое положение. *Формирование анкилитовых руд Вуориярви протекало под влиянием высококонцентрированного флюида, состав которого эволюционировал от сульфатного до карбонатного на фоне снижения температуры от 350 °С до 250 °С. Образование бастнезитовых руд происходило при температуре 100 °С – 250 °С при участии низкоконцентрированного флюида, состав которого эволюционировал от хлорид-гидрокарбонатного до хлоридного.*

Флюидные включения в минералах карбонатов участка Петяйян-Вара. Для исследования флюидных включений (ФВ) в поздних карбонатах Петяйян-Вары (Prokopyev et al., 2020) были выбраны наиболее представительные образцы трёх типов кварцсодержащих пород: (1) анкилитовых, (2) бастнезитовых и (3) гибридных карбонатов, содержащие все установленные минеральные ассоциации карбонатов участка. Изучению подверглись кристаллы кварца и поздних генераций кальцита и доломита, а также зернистые агрегаты этих минералов из

ассоциации с поздними гидро(карбо)термальными минералами Ва, Sr и РЗЭ (баритом, стронцианитом, анкилитом, бастнезитом, монацитом и др.). В соответствии с классификацией Е. Рёддера (Roedder, 1984), микроскопически были выделены четыре типа ФВ: первичные высококонцентрированные кристаллофлюидные включения в кварце и кальците (тип I), вторичные и псевдвторичные высококонцентрированные (тип II) и среднеконцентрированные (тип III) кристаллофлюидные включения в кварце и карбонатах, а также изобилующие газовой-жидкие первичные и вторичные флюидные включения в доломите, кальците и кварце (тип IV) (Рис. 5).

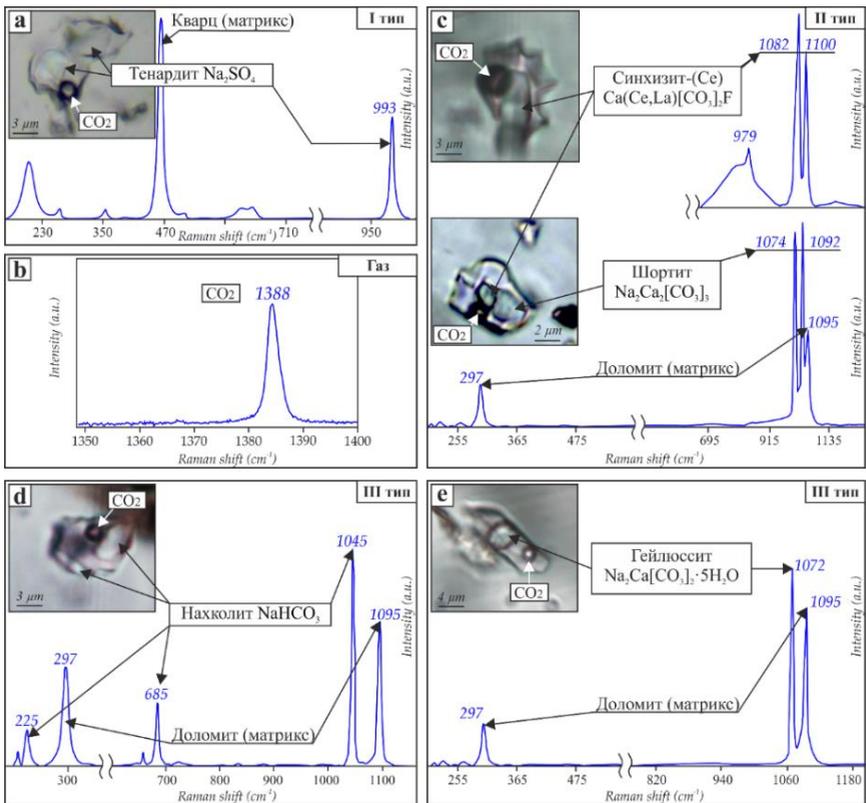


Рис. 5. Рамановское исследование ФВ в минералах, ассоциирующих с РЗЭ-минерализацией из карбонатитов Петяян-Вары. (а) Микрофотография и спектр дочерней фазы тенардита в ФВ I типа из кварца; (б) спектр газовой фазы CO_2 из ФВ; (в) ФВ II типа со спектрами дочерних фаз синхизита-(Ce) и шортита из доломита; ФВ III типа и спектры дочерних фаз (д) нахколита и (е) гейлюссита из доломита. Иллюстрация из (Prokopyev et al., 2020).

Первичные включения I типа расположены одиночно и группами по 2–3 включения размером от 5 до 20 мкм как в центральных частях, так и в зонах роста зёрен кварца и кальцита, слагающих матрикс породы. Эти включения характеризуются округлой или неправильной формой и трёхфазным составом. В них содержится от 2 до 4 об.% газовой фазы, а также жидкая фаза и 1–3 твердые анизотропные кристаллические фазы (см. Рис. 5а). Кристаллические фазы занимают более 75% объёма включений, что указывает на высокую концентрацию солей во флюиде. При помощи рамановской спектроскопии было установлено, что газовая фаза представлена CO_2 (см. Рис. 5b), а дочерние фазы – тенардитом Na_2SO_4 и ангидритом CaSO_4 . В ходе микротермометрических экспериментов были определены температуры гомогенизации включений (300–350 °C) и растворения газового пузырька (290–300 °C). Концентрация таких флюидов при давлении более 1000 бар оценивается в более чем 50 масс.% (Kotel'nikova and Kotel'nikov, 2009); давление было принято в соответствии с геологическими данными (Кухаренко и др., 1965; Arzamastsev et al., 2001). Исходя из места изученных минералов-хозяев ФВ в общей последовательности минералообразования можно заключить, что ФВ I типа захватили флюид, который циркулировал на начальном этапе первой стадии метасоматоза, сопровождавшейся накоплением РЗЭ. Его воздействие вызвало растворение бурбанкита в первичных карбонатитах и перенос высвобожденных редких земель, стронция и бария с осаждением их в составе баритовых и анкилитовых карбонатитов.

Вторичные и псевдвторичные высококонцентрированные ФВ II типа расположены вблизи границ зёрен и по трещинам в кварце и доломите матрикса. Эти включения изометричны в плане, их диаметр составляет от 5 до 15 мкм. Так же, как и в первичных включениях, в них содержится газовая (CO_2 , 1–2 об.%), жидкая и 1–3 твердые анизотропные кристаллические дочерние фазы (40–65 об.%). Кристаллические фазы представлены дочерними синхизитом-(Ce) $\text{Ca}(\text{Ce},\text{La})(\text{CO}_3)_2\text{F}$ и шортитом $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$ (см. Рис. 5с), а в некоторых случаях – ксеногенными кристаллами доломита и монацита-(Ce). Интервал температур гомогенизации включений данного типа составляет 225–280 °C, а указанные дочерние кристаллические фазы обычно растворяются при 250–275 °C. В расчёте для идеализированной системы $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при давлении 1000–1500 бар [согласно (Koster van Groos, 1990)] суммарную концентрацию ФВ II типа можно оценить в 40–45 масс.% и выше. ФВ II типа захватили флюид, который циркулировал на завершающем этапе первой стадии метасоматоза, сопровождавшейся накоплением РЗЭ. Данному этапу соответствует замещение доломита кальцитом, появление в анкилитовых карбонатитах бастнезит-синхизитовых сростаний и формирование гигантозернистых кальцитовых карбонатитов.

Флюидные включения III типа наблюдались в минералах кальцитовых, кварцевых и поздних доломитовых прожилков. Они представляют собой трёхфазные включения вытянутой и неправильной формы и состоят из CO_2 (1–2 об.%), жидкой фазы и 1–2 кристалликов дочерних фаз (1–15 об.%). В качестве дочерних фаз выступают нахколит NaHCO_3 и гейлюссит $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (см. Рис. 5d,e), а также кубические кристаллы галита NaCl . Исходя из результатов микротермометрических экспериментов, температура гомогенизации для включений III типа равна 190–250 °С, а растворение кристаллической фазы происходит при 140–220 °С. Концентрация солей оценивалась на основании экспериментов по криотермометрии: температура плавления льда составляет -10 ± 1 °С, температура эвтектики – от -21 до -22 °С, а температура плавления нахколита – 145 ± 5 °С. С учётом этих данных, согласно диаграмме тройной системы NaHCO_3 – NaCl – H_2O , концентрация кристаллических фаз во ФВ составляет 20–21 масс.% NaHCO_3 и 10–11 масс.% NaCl (Борисенко, 1977). ФВ III типа захватили флюид, который циркулировал на начальном этапе второй стадии метасоматоза, сопровождавшейся разубоживанием РЗЭ. На данном этапе произошло растворение анкилита и формирование кварц-бастнезитовой ассоциации.

Флюидные включения IV типа выделяются среди прочих двухфазным составом. В них в различных концентрациях входят только CO_2 и жидкая фаза. Включения этого типа обнаружены в поздних генерациях карбонатов и кварца, заполняющих поздние жилы и трещины в породе и пересекающих Ва-Sr-редкоземельные минеральные ассоциации. Их размер варьирует в диапазоне 5–15 мкм, форма – округлая или неправильная. В таких флюидах концентрация оценивается в 5–15 масс.% NaCl -экв., что по (Roedder, 1984) соответствует относительно низкоконцентрированным флюидам с температурой эвтектики в пределах от -10 до -5 °С. Диапазон температур гомогенизации газово-жидких ФВ IV типа составляет 150–200 °С. ФВ III типа захватили флюид, который циркулировал на начальном этапе второй стадии метасоматоза, сопровождавшегося разубоживанием РЗЭ. На данном этапе произошло растворение анкилита и формирование кварц-бастнезитовой ассоциации. ФВ IV типа захватили флюид, циркулировавший на заключительном этапе второй стадии метасоматоза, также сопровождавшейся разубоживанием РЗЭ. На данном этапе кристаллизовались поздние стронцианит, кварц и Са-Mg-Fe карбонаты.

Таким образом, температура высококонцентрированного сульфатно-карбонатного флюида (ФВ I и II типов) менялась от 350 °С в начале до 250 °С в конце первого метасоматического события (Рис. 6). Температура средне-низкоконцентрированного гидрокарбонатно-хлоридного флюида (ФВ III и IV типов), действовавшего на породы в ходе второго метасоматического события, составляла порядка 150–200 °С.

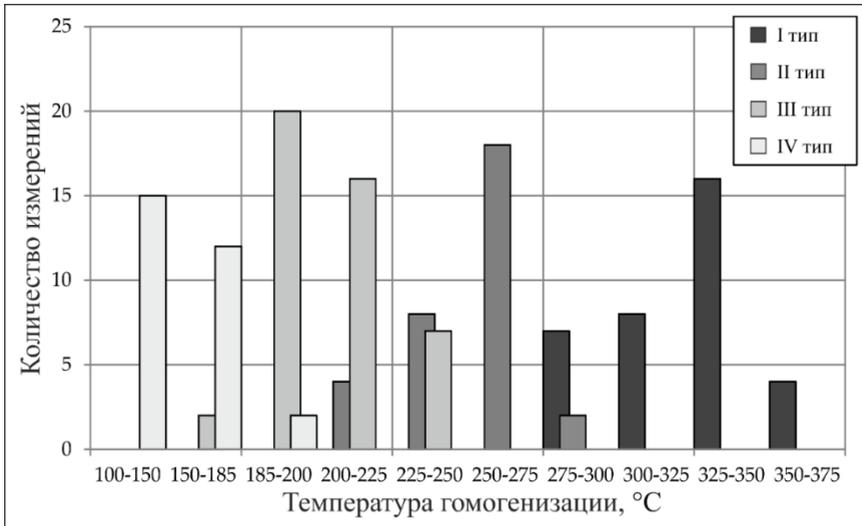


Рис. 6. Термометрические данные по ФВ в минералах из ассоциации с Ва, Sr и редкоземельной минерализацией карбонатитов Петяйян-Вары. Иллюстрация из работы (Prokopyev et al., 2020).

Третье защищаемое положение. Карбонатитовый расплав был продуктом изотопно деплетированного мантийного источника и не был контаминирован коровым веществом. Анкилитовые карбонатиты образовались непосредственно после карбонатитового магматизма под воздействием смеси корового и ортомагматического флюидов. Формирование бастнезитовых руд стало следствием поздней переработки анкилитовых карбонатитов флюидом корового происхождения.

Изотопные системы (Sm–Nd, Rb–Sr, C, O) в карбонатитах участков Петяйян-Вара и Неске-Вара (массив Вуориярви). С целью определения источника(ов) вещества карбонатитов и оценки возраста метасоматических процессов был изучен ряд изотопных систематик. Ранее возраст карбонатитов и клинопироксенитов Вуориярви был определен рубидий-стронциевым изохронным методом в ~ 380 млн лет при первичном отношении стронция 0.703 (Гоголь и Деленицин, 1999). Среди изученных пород лишь ранние кальциокарбонатиты Неске-Вары и бурбанкит-содержащие магнезиокарбонатиты Петяйян-Вары имеют такое же отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Рис. 7). Изотопные метки данных карбонатитов близки к характеристикам деплетированного мантийного источника.

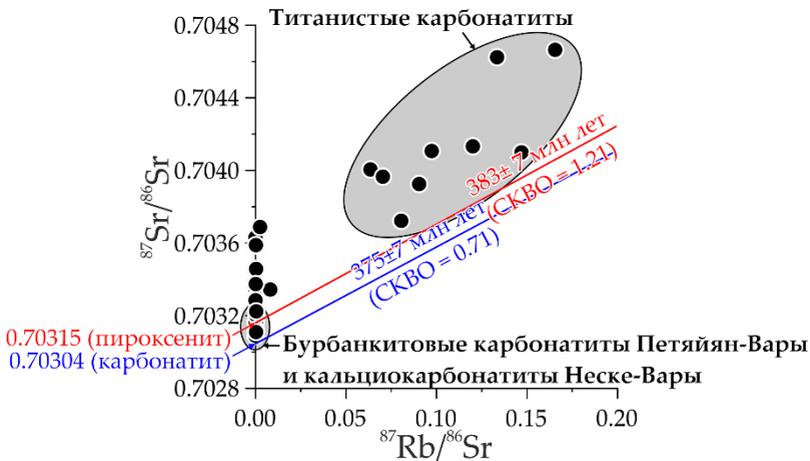


Рис. 7. Диаграммы отношений $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ к $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для карбонатитов Петяйян-Вары и кальциокарбонатитов Неске-Вары. Приведены изохроны для клинопироксенитов (красная линия) и карбонатитов (синяя линия) массива Вуориярви по данным (Гоголь и Деленицин, 1999).

Фигуративные точки остальных пород расположились выше рассматриваемых изохрон. Сколь-либо значимые содержания рубидия установлены лишь для титанистых карбонатитов. Это позволяет заключить, что у большинства карбонатитов Петяйян-Вары смещение точек вдоль оси $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ стало следствием привноса радиогенного стронция.

На диаграмме в координатах $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ половина фигуративных точек карбонатитов Петяйян-Вары формирует изохрону с наклоном, отвечающим возрасту 365 млн лет при $\epsilon\text{Nd}_{365\text{Ma}}$ около +5. Это также указывает на участие вещества деплетированной мантии. На эту изохрону помимо ранних карбонатитов (за исключением некоторых титанистых) легли точки карбонатитов, возникших в ходе первой стадии метасоматоза. Как было установлено при геохимическом исследовании, при формировании данных пород происходило химическое фракционирование РЗЭ, которое должно было нарушить Sm–Nd изотопную систему. Сохранность системы свидетельствует о том, что стадия концентрирования РЗЭ (первое метасоматическое событие) завершилась до накопления радиогенного ^{143}Nd , то есть без существенного отрыва во времени от магматического события. У бастнезитовых и стронцианитовых карбонатитов фигуративные точки составов смещены под изохрону, что указывает на (1) нарушение изотопной системы и (2) на их образование в момент, когда радиогенный ^{143}Nd уже был накоплен, т.е. существенно позднее как магматического, так и первого метасоматического событий.

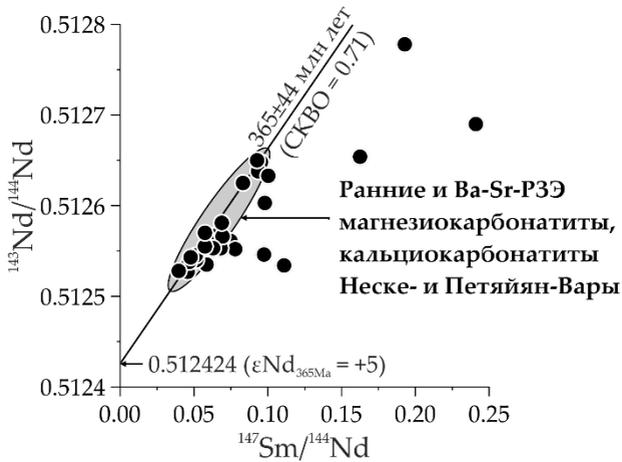


Рис. 8. Диаграммы отношений $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ к $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ для карбонатов участка Петяйян-Вара и кальциокарбонатов участка Неске-Вара. Оценка возраста из работы (Fomina and Kozlov, 2021).

На диаграмме изотопных характеристик углерода и кислорода $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ в поле первично-магматических карбонатов (PIC) попали точки кальциокарбонатов Неске-Вары, а рядом – бурбанкитсодержащих магнезиокарбонатов Петяйян-Вары (Рис. 9).

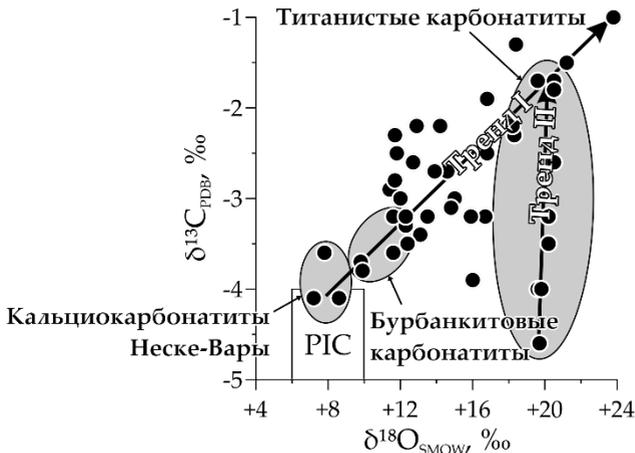
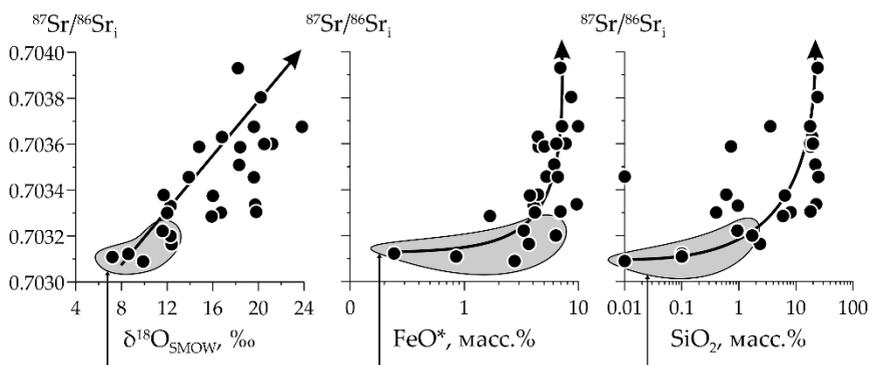


Рис. 9. Диаграмма в координатах $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (в ‰) для карбонатов участка Петяйян-Вара и кальциокарбонатов участка Неске-Вара. Прямоугольником показано поле “первично-магматических карбонатов” (PIC) в соответствии с данными из работ (Deines, 1989; Taylor et al., 1967).

Большинство прочих образцов выстроилось вдоль диагонального тренда от поля PIC в сторону согласованного утяжеления изотопного состава и кислорода, и углерода (Тренд I на Рис. 9). Такой тренд обычно интерпретируется как следствие рэлеевского фракционирования и/или высокотемпературного изменения карбонатов. Титанистые карбонаты сформировали собственный тренд широких вариаций изотопного состава углерода при неизменно тяжелом кислороде (Тренд II на Рис. 9). При этом мантийный углерод установлен в пробах с неизменной Sm–Nd системой. Сочетание изотопно лёгкого углерода и тяжёлого кислорода подтверждает предположение о том, что титанистые карбонаты возникли в ходе контактового взаимодействия карбонатитового расплава и вмещающих силикатных пород. Сходную картину можно наблюдать при изучении продуктов контактового взаимодействия карбонатного и силикатного вещества, например, таких как скарны (Baumgartner and Valley, 2001; Valley, 1986).

В ходе диссертационного исследования была установлена связь между радиогенностью стронция и утяжелением изотопного состава кислорода (Рис. 10). Такая же связь прослеживается с содержанием железа и кремнезема, то есть с теми компонентами, которые были привнесены из вмещающих пород. Таким образом, вариации изотопного состава кислорода могут быть объяснены вовлечением корового флюида, несшего кремнезем, железо и радиогенный стронций. Коровый флюид, по-видимому, не оказал существенного влияния лишь на кальциокарбонаты Неске-Вары и бурбанкитсодержащие магнезиокарбонаты Петяйян-Вары, но участвовал в эволюции всех прочих карбонатов участка.



Бурбанкитовые карбонаты Петяйян-Вары и кальциокарбонаты Неске-Вары
Рис. 10. Соотношения $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (‰), FeO^* (масс.%) и SiO_2 (масс.%) с $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ в карбонатах Петяйян-Вары и кальциокарбонатах Неске-Вары.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный комплекс данных (геологических, минералогических, геохимических, термобарогеохимических, изотопных) даёт основание для построения общей модели образования карбонатитов участка Петяйян-Вара массива Вуориярви. Данная модель включает три последовательные стадии (на Рис. 11 поля а, б и с), каждая из которых состоит из нескольких этапов (на Рис. 11 отмечены цифрами).

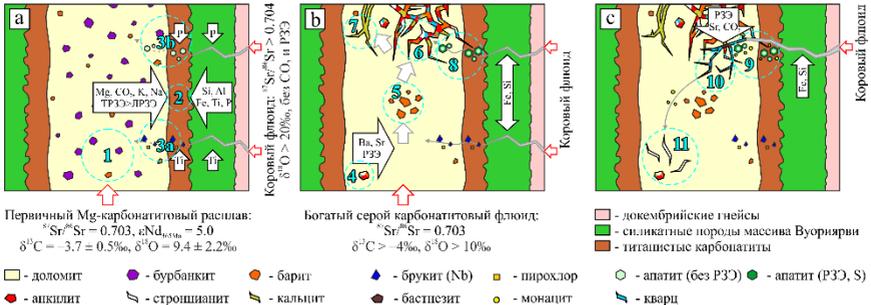


Рис. 11. Модель формирования карбонатитов участка Петяйян-Вара. Пояснения в тексте. Иллюстрация из работы (Fomina and Kozlov, 2021).

На магматической стадии (поле “а” на Рис. 11) происходило (1) внедрение карбонатитового расплава в силикатные породы массива Вуориярви. Расплав обладал высокими концентрациями Ba, Sr и P3E, а также изотопными характеристиками, присущими деплетированной мантии. В результате этого внедрения образовались первичные бурбанкитсодержащие магнезиокарбонаты. (2) Контактное взаимодействие карбонатитового расплава с силикатными породами привело к образованию титанистых карбонатитов с мантийными метками углерода ($\delta^{13}\text{C}$ около -4%) и изотопно тяжёлым кислородом ($\delta^{18}\text{O}$ около $+20\%$). Эти породы унаследовали K, Na, Mg, CO_2 и P3E (в основном тяжёлые) от расплава и захватили Si, Al, Fe, Ti и P из вмещающих пород. С коровыми флюидами была привнесена дополнительная порция Ti, Nb и P, что вызвало кристаллизацию (3а) брукитовой, пироклоровой и (3б) безредкоземельной апатитовой минерализации в титанистых карбонатитах и прилегающих к ним бурбанкитсодержащих магнезиокарбонатах.

На ранней постмагматической стадии (поле “б” на Рис. 11) первичные бурбанкитсодержащие магнезиокарбонаты (4) были подвергнуты воздействию высококонцентрированного, обогащённого серой карбонатитового флюида с $T > 350^\circ\text{C}$, который растворял бурбанкит и накапливал в себе высвобожденные таким образом Ba, Sr и P3E. Эти ремобилизованные элементы осаждались последовательно. Сначала

образовались (5) баритовые магнезиокарбонатиты, затем (6) анкилитовые, а вслед за ними (7) гигантозернистые кальциокарбонатиты. Следствием влияния этого флюида также стало (8) формирование эпитаксиальных каём обогащённого РЗЭ и S апатита вокруг безредкоземельного апатита первой генерации. Во всех перечисленных выше породах Sm–Nd система оставалась закрытой с самого начала образования комплекса, что указывает на короткий промежуток времени между интрузией магмы и ранними постмагматическими процессами.

Поздние процессы метасоматического преобразования карбонатитов (поле “с” на Рис. 11) протекали под действием слабосолёного гидрокарбонатно-хлоридного корового флюида, циркулировавшего при $T^{\circ} > 150^{\circ}\text{C}$. Взаимодействие этого флюида с карбонатитами привело к (9) растворению апатита и отложению монацита, (10) кристаллизации кварц-бастнезитовой минеральной ассоциации при разложении анкилита, а также к (11) образованию стронцианитовых карбонатитов за счёт ремобилизованного Sr. Коровый флюид оказал сильное влияние на все изученные изотопные системы и существенно обогатил карбонатиты радиогенным стронцием.

Данная модель охватывает процессы формирования всех разновидностей карбонатитов, выявленных на сегодняшний день в пределах участка Петяйян-Вара и, исходя из опубликованных данных и наблюдений автора, может быть экстраполирована на весь комплекс Вуориярви.

Список работ по теме диссертации, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Kozlov E., **Fomina E.**, Sidorov M., Shilovskikh V. Ti-Nb Mineralization of Late Carbonatites and Role of Fluids in Its Formation: Petyayan-Vara Rare-Earth Carbonatites (Vuoriyarvi Massif, Russia) // *Geosciences*. 2018. Vol. 8. № 8. P. 281. DOI: 10.3390/geosciences8080281.
2. Козлов Е. Н., **Фомина Е. Н.**, Сидоров М. Ю., Киркин В. В. Генезис апокарбонатитовых титанистых метасоматитов редкоземельного рудопоявления Петяйян-Вара (Вуориярви, Кольский регион) // *Вестник МГТУ*. 2018. Т. 21. № 1. С. 37–50. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-37-50.
3. **Fomina E.**, Kozlov E., Ivashkevskaja S. Study of diffraction data sets using factor analysis: a new technique for comparing mineralogical and geochemical data and rapid diagnostics of the mineral composition of large collections of rock samples // *Powder Diffraction*. 2019. Vol. 34. № S1. P. S59–S70. DOI: 10.1017/s0885715619000435.
4. Kozlov E., **Fomina E.**, Sidorov M., Shilovskikh V., Bocharov V., Chernyavsky A., Huber M. The Petyayan-Vara Carbonatite-Hosted Rare Earth Deposit (Vuoriyarvi, NW Russia): Mineralogy and Geochemistry // *Minerals*. 2020. Vol. 10. № 1. P. 73. DOI: 10.3390/min10010073.

5. Prokopyev I., Kozlov E., **Fomina E.**, Doroshkevich A., Dyomkin M. Mineralogy and Fluid Regime of Formation of the REE-Late-Stage Hydrothermal Mineralization of Petyayan-Vara Carbonatites (Vuoriyarvi, Kola Region, NW Russia) // *Minerals*. 2020. Vol. 10. № 5. P. 405. DOI: 10.3390/min10050405.

6. **Fomina E. N.**, Kozlov E. N. Stable (C, O) and radiogenic (Sr, Nd) isotopic evidence for REE-carbonatite formation processes in Petyayan-Vara (Vuoriyarvi massif, NW Russia) // *Lithos*. 2021. Vol. 398-399. P. 106282. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106282

7. Kozlov E., Skiba V., **Fomina E.**, Sidorov M. Noble gas isotopic signatures of sulfides in carbonatites of the Vuoriyarvi alkaline-ultrabasic complex (Kola Region, NW Russia) // *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. № 17. DOI: 10.1007/s12517-021-07884-9.

8. Kozlov E. N., **Fomina E. N.** Mass balance of complementary metasomatic processes using isocon analysis // *MethodsX*. 2022. Vol. 9. P. 101609. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101609

Материалы конференций

1. Kozlov E. N., **Fomina E. N.**, Mytsa D. D., Kirkin V. V. Rare-earth carbonatites of the Vuoriyarvi (Kola region): first results of the study // Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits: Proceedings of XXXIV International Conference / Editors V. A. Zaitsev, V. N. Ermolaeva. Miass. 4–9 August 2017. P. 117-120.

2. **Fomina E. N.**, Kozlov E. N., Sidorov M. Yu., Shilovskikh V. V. Ti-Nb mineralization in late carbonatites of the Petyayan-Vara (Vuoriyarvi) // Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits. Moscow. 3–7 September 2018. P. 94-97.

3. Kozlov E. N., **Fomina E. N.** Mechanism of enrichment of late carbonatites by heavy rare-earth elements: a case study of the Petyayan-Vara field (Vuoriyarvi massif, NW Russia) // Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits. Saint Petersburg. 23–26 May 2019. P. 158–161.

4. **Fomina E.**, Kozlov E. Express diagnostics of mineral phases by factor analysis of X-ray diffraction patterns // 16th European Powder Diffraction Conference EPDIC-16 abstracts. Edinburgh, UK. 1–4 July 2018. P. 133.

5. Kozlov E., **Fomina E.** Sr-Nd-C-O isotope composition of carbonatites of the Petyayan-Vara REE deposit (Vuoriyarvi, Kola Region, NW Russia): Insight to the origin // EGU General Assembly-2020 abstracts. Vienna, Austria. 4–8 May 2020. EGU2020-13114. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-13114>.

6. **Fomina E.**, Kozlov E. Formation of REE-rich carbonatites from the Petyayan-Vara area (Vuoriyarvi Massif, NW Russia) // Goldschmidt-2021 abstracts. Lion, France. 5–9 July 2021. <https://doi.org/10.7185/gold2021.4244>.