

УТВЕРЖДАЮ
Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции
Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского
Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)



Член-корреспондент РАН Р.Х. Хамизов

«15» февраля 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук на диссертационную работу Фоминой Екатерины Николаевны «Редкоземельные карбонатиты массива Вуориярви (Кольская щелочная провинция): петрология и рудогенез», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальностям 1.6.3 – петрология, вулканология и 1.6.10 – геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

В диссертации Фоминой Екатерины Николаевны представлены результаты геологических, геохимических и минералогических исследований участка Петяйянваря щелочно-ультраосновного с карбонатитами комплекса Вуориярви (Кольская щелочная провинция), уникального по минеральному парагенезису магматически-карботермальных карбонатитов и перспективного на редкоземельные руды. Работа проводилась с целью определения источников вещества и реконструкции генезиса редкоземельных карбонатитов, характеристики флюидного режима, выявления геохимических факторов накопления и перераспределения REE. Для этого решались задачи геологического изучения строения карбонатитовых тел. Автор диссертационной работы провела прецизионные петролого-минералогические и геохимические исследования пород с выявлением стадийности их формирования, изотопно-геохимических характеристик, роли различных источников в формировании редкоземельных карбонатитов, определения физико-химических параметров флюидного режима формирования пород различных стадий. Автором даны оценки масштаба и направления миграции компонентов в ходе метасоматических преобразований пород, кроме того построена генетическая модель формирования поздних редкоземельных карбонатитов.

Актуальность диссертационной работы заключается в том, что современное общество и его технологическое развитие невозможно без использования редкоземельных элементов. Востребованность такого сырья растет с каждым годом, а практически монопольное обладание импорта этих металлов Китаем, ставит проблему разработки редкоземельных месторождений в России как наиболее важную и стратегическую. В настоящее время добыча редкоземельного концентрата производится на единственном Ловозерском месторождении (Кольский п-в), где для этого используют лопаритовые руды. Ввод в разработку и добычу карбонатитового сырья позволит существенно нарастить производство и разрабатывать руды с более высокой обогатимостью в отношении REE. Поскольку палеозойские щелочно-ультраосновные комплексы с карбонатитами являются перспективными на редкоземельное сырье (Афанасьев, 2011), то постановка петрологических, геохимических и минералогических работ по их изучению отражает как практическую, так и научную значимость диссертационной работы.

Для щелочно-ультраосновного комплекса Вуориярви характерна многостадийность формирования пород карбонатитовой серии, объединяющих как магматические кумулятивные породы, так и породы переходные от магматической к карботермальной (гидротермальной) стадиям (Mitchell, Gittins, 2022). Породы карбонатитовой серии всех

стадий обогащены REE, но наибольшие концентрации и формирование редкоземельной минерализации вплоть до рудных количеств происходит при завершении процесса карбонатитообразования. Построение петрогенетических моделей и выявление факторов, способствующих рудоконцентрированию именно на поздних стадиях является актуальным и в фундаментальном научном плане. Сложная многостадийная эволюция редкоземельных карбонатитов дает большой простор для исследования уникальных минеральных ассоциаций и позволяет получить новые характеристики для редких минеральных фаз. Участок Петяйянваря комплекса Вуориярви является одним из интереснейших и необычных геологических объектов. Полученные в результате исследования петролого-геохимические данные позволяют по-новому взглянуть на спектр возможных рудообразующих сред щелочно-ультраосновных систем.

Научная новизна работы Е.Н.Фоминой заключается в том, что впервые получены новые оригинальные геологические, петролого-минералогические, геохимические, включая изотопные данные для перспективных на REE пород конкретного участка Петяйянваря, научное изучение которого ранее практически не проводилось. Впервые для редкоземельных карбонатитов позднего магматически-карботермального генезиса описаны механизмы концентрирования REE и предложена модель формирования редкоземельного месторождения. Важность и значимость полученных диссертантом результатов не вызывает сомнений. Предложен новый авторский подход - методики статистического сопоставления рентгеновских и геохимических данных, и масс-баланса комплементарных метасоматических процессов, которые могут быть применены для геологических объектов подобного типа.

Фактический материал, положенный в основу диссертации представлен и информативен. Он включает каменный материал, собранный при непосредственном участии автора диссертации в нескольких полевых сезонах, проведенных на территории комплекса Вуориярви, а также большой объем аналитических данных, полученных различными методами. Автором использованы результаты петрографического описания пород, КР спектроскопии состава минералов и флюидных включений в них, EDS и WDS определения состава минералов, дифрактометрического фазового анализа, определения состава пород методами мокрой химии и ICP-MS, изотопных исследований состава пород (C-O, Rb-Sr, Sm-Nd системы). Исследования выполнены на современном уровне в крупных аналитических центрах - ГИ КНЦ РАН и ИХТРЭМС КНЦ РАН (г. Апатиты), РЦ «Геомодель» научного парка СПбГУ (г. Санкт-Петербург, Новосибирском, ГИН РАН (г. Москва), ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург) и ЦКП МИИ СО РАН (г. Новосибирск). Личный вклад Е.Н.Фоминой помимо сбора и обработки каменного материала, получении первичных петрографических и минералогических характеристик, заключался в скрупулёзной работе с литературными данными (более 400 источников), проведении рамановских, EBSD и микронзондовых исследований, выполнении факторного и масс-балансового анализов с разработкой оригинальных методик, анализе и интерпретации полученных данных.

Результаты диссертации были представлены в виде докладов на 6-ти крупных научных конференциях - «Щелочной магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов» (Россия); Европейской конференции по порошковой дифракции «EPDIC-16» (Великобритания); Генеральная ассамблея Европейского союза – «EGU-2020» (Австрия); опубликованы в 8-ми статьях в журналах из списка ВАК, а также в тезисах материалов и трудов международных и российских конференций.

Представленная диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и 3 приложений. Список литературы включает 413 наименований. Полученные диссертантом результаты отражены в трех защищаемых положениях, обоснованность которых не вызывает сомнений.

Введение полностью отражает суть диссертации, ее фактический материал, общие характеристики полученных результатов и сформулированные защищаемые положения.

Первая глава представляет обширные литературные данные по классификациям пород карбонатитовой серии, геолого-структурным особенностям нахождения карбонатитовых комплексов, их геохимическому и минералогическому разнообразию, кратким изотопным

характеристикам источников формирования карбонатитов, гипотезам их происхождения, а также полезным ископаемым с ними связанным.

В главе 2 представлено описание каменного материала, отобранного из пород участка Петяйянвара, а также использованных в работе методов и методик.

В главе 3 рассмотрены петрографические особенности и минеральный состав пород участка, выделены 6 основных разновидностей поздних карбонатитов и приведена последовательность их формирования. Представлены данные по разнообразию и составу основных минералов-концентраторов редких земель, прослежена последовательность их кристаллизации. Кристаллографические и минералогические исследования выполнены на высоком уровне и являются достаточной основой для обоснования и доказательства выдвинутых защищаемых положений.

Четвертая глава является наиболее значимой для работы и включает геохимические данные по петрогенным и микроэлементам, а также их интерпретацию. Детально рассмотрено фракционирование редких земель в поздних карбонатитах разных типов, приведены объяснения для их вариаций и связь с минералами-концентраторами этих элементов. При помощи новой - авторской методики пересчета с применением факторного анализа показана статистическая связь между минералогическими и геохимическими характеристиками карбонатитов Петяйянвары. Показано, что минералы, ответственные за вариативность состава типов карбонатитов совпадают с изученными в парагенезисах. По методу масс-баланса предложена расчётная модель формирования разных типов поздних REE карбонатитов путем метасоматического флюидного воздействия на более ранние типы карбонатитов с переотложением компонентов в породы более поздних стадий. Данная модель позволила количественно оценить масштаб массопереноса на конкретном участке комплекса Вуориярви. Автором детально исследована геохимия и минералогия Ti-REE карбонатитов, показано их сходство с подобными породами других карбонатитовых комплексов (Фен, Деар-Лодж, Морро-дос-Сейс-Лагос и др.) и предложена гипотеза формирования, отображающая привнос компонентов за счет переработки вмещающих карбонатитов пород. Приведено обсуждение механизмов формирования Nb- и REE-содержащих фаз, для последних описаны граничные условия разделения легких и тяжелых редких земель.

В главе 5 представлены данные изучения флюидных включений в кварце, поздних генерациях кальцитовых и доломитовых карбонатитов, позволившие охарактеризовать физико-химические параметры кристаллизации гидротермально-метасоматических карбонатитов участка Петяйянвары. Полученные данные показали существенные вариации состава флюида и температур формирования этих пород, а также его ведущую роль в переносе и отложении редких земель.

Шестая глава посвящена исследованию Rb-Sr, Sm-Nd и C-O изотопии поздних карбонатитов. Приведены характеристики возможных источников поступления вещества для их формирования и условия процессов смешения. По степени нарушенности изотопных систем сделано предположение единого источника (но не механизма) формирования магматически-карботермальных бурбанкитовых карбонатитов участка Петяйянвары с магматическими кальцитовыми карбонатитами комплекса Вуориярви и роста влияния корового компонента при формировании более поздних гидротермально-метасоматических карбонатитов. Показано, что главная стадия накопления REE проходила в короткий промежуток времени в карбонатитах с наименее нарушенной изотопной системой.

Седьмая глава диссертации представляет собой логическое завершение исследования и предлагает ряд выводов по модели формирования и эволюции всех разновидностей редкоземельных карбонатитов участка Петяйянвары комплекса Вуориярви.

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить:

1 Диссертация, заявленная, как изучение редкоземельных карбонатитов комплекса Вуориярви, представляет исследование одного конкретного участка, и слабо затрагивает карбонатиты с редкоземельной минерализацией из других, не менее масштабных проявлений (например, участок Нескевара).

2 Часть информации из первой главы, касающаяся перечисления многообразия карбонатитов и месторождений с ними связанных, представляется избыточной в силу того,

что работа посвящена конкретно интрузивному щелочно-ультраосновному с карбонатитами комплексу, который имеет определенные для этой формации геологические, геохимические и петрологические характеристики. И лучше было бы подробнее остановиться на них, в том числе и на общем представлении последовательности кристаллизации пород, чтобы в дальнейшем избежать путаницы в трактовке первичности доломитовых карбонатитов с бурбанкитом

3. Автор недостаточно ясно показал последовательность формирования пород в щелочно-ультраосновных комплексах Кольской щелочной провинции (КЩП), не провел границу по стадиям кристаллизации пород карбонатитовой серии, а она определена во многих классических монографиях. Разграничение между породами карбонатитовой серии раннемагматических стадий – фоскоритами и сопряженными с ними карбонатитами, и породами поздних магматически-карботермальных стадий, представленных доломитовыми, кальцит-доломитовыми, анкеритовыми и др. карбонатитами проходит достаточно четко. То, что в диссертации называется первично магматическими бурбанкитовыми карбонатитами, по существу является ранним типом карбонатита магматически-карботермального этапа. Эта неточность дезориентирует читателя, ведь по сути в работе описывается стадийность формирования и генезис поздних магматически-карботермальных карбонатитов, а не всех дифференциатов карбонатитового расплава. В итоге можно подумать, что именно «первично магматические бурбанкитовые карбонатиты» были ранними фазами кристаллизации расплава, а не поздними производными, что в принципе и подтвердили изотопные данные.

4 Следующее замечание касается выделения типов исследуемых пород и их описании в работе. На рис. 4 приведены 5 типов карбонатитов, на рис. 23 их уже 6, в таблице 5 – 9, за исключением гибридных, которые также выделяются как тип пород. Логичнее было бы уже в первых главах показать и охарактеризовать все представленные разновидности пород участка и определить их количественное соотношение. Это было бы полезно и для изотопных построений, где часть разновидностей показана лишь одной пробой, и читатель не понимает насколько она информативна и насколько доверительно можно относиться к интерпретации результатов (выделении трендов). Читатель сталкивается с путаницей понятий - тип карбонатита, минеральная ассоциация и порода.

5 Небольшое замечание к редкой распространенности редкоземельных карбонатитов с рудной анкилитовой минерализацией. Это не так, поскольку даже в КЩП, в крупном комплексе Себлявр такая минерализация в отсутствии связи с бурбанкитом, является рудной. Глубина ее развития прослежена от первых десятков (сразу под корой выветривания) до 400-500 метров.

6 При обсуждении минеральных ассоциаций, составов минералов, генетических построений, сопоставлениях вариаций состава пород с вариациями состава минералов в них, практически везде отсутствуют ссылки на соответствующие таблицы в приложении. Кроме этого в таблицах для минералов не приведены формульные значения. Это важно, например, при обсуждении вариативности состава минералов гр. пирохлора и степени заполнения кристаллохимических позиций. Сравнение составов минералов очень неудобно проводить в единой таблице с пустыми ячейками. В некоторых случаях при обсуждении эволюции составов минералов не хватает соответствующих рисунков, где были бы вынесены сравниваемые составы минералов из разных ассоциаций.

7 Небольшое замечание касается представленных рисунков, в подписях под многими из них стоит ссылка на опубликованную работу, первым автором которой часто выступает не диссертант, читатель в этом случае не может определить авторство полученного материала, создается впечатление коллективной работы. Гораздо выигрышнее смотрелись бы действительно оригинальные рисунки.

В целом диссертация Е.Н. Фоминой представляется завершенной. Приведенный литературный обзор геолого-геохимических и минералогических исследований для карбонатитов комплекса Вуориярви, а также фактический материал, представленный в главах 3-6 позволил диссертанту поставить и обосновать цели и задачи изучения магматически-карботермальных REE карбонатитов на одном из участков этого комплекса, убедительно доказать защищаемые положения. К достоинствам диссертации следует отнести высокий

уровень представления полученных данных по строению и составу изученных пород и минералов, а также привлечение для их обработки современных методов и методик, некоторые из которых разработаны автором впервые.

Несмотря на указанные замечания, которые скорее являются рекомендательными, представленная работа выполнена самостоятельно, на высоком научном уровне и является законченным исследованием. Содержание диссертации полностью соответствует автореферату и присваиваемым специальностям.

Диссертация «Редкоземельные карбонатиты массива Вуориярви (Кольская щелочная провинция): петрология и рудогенез» отвечает требованиям и критериям, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., №842 для ученой степени кандидата наук, а ее автор Фомина Екатерина Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальностям 1.6.3 – петрология, вулканология и 1.6.10 – геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения.

Обсуждение диссертационной работы Фоминой Екатерины Николаевны состоялось на расширенном заседании лаборатории геохимии и рудоносности щелочного магматизма ГЕОХИ РАН, одним из основных направлений научно-исследовательской деятельности которой является изучение геохимических процессов формирования магматических пород щелочно-ультраосновных и щелочных формаций, а также связанных с ними месторождений.

Отзыв организации на диссертационную работу Фоминой Екатерины Николаевны заслушан и одобрен в качестве официального на расширенном заседании лаборатории, протокол №1 от 14 февраля 2023 г., председатель заседания Академик РАН Когарко Л.Н., секретарь к г.-м.н. Сорохтина Н.В.

Заведующий лабораторией
геохимии и рудоносности щелочного
магматизма ГЕОХИ РАН,
Академик РАН

Когарко Лия Николаевна

Старший научный сотрудник лаборатории
геохимии и рудоносности щелочного
магматизма ГЕОХИ РАН, кандидат
геолого-минералогических наук

Сорохтина Наталья Владиславовна



Я, Когарко Лия Николаевна, согласна

на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой
диссертационного совета и дальнейшую их обработку.

20.01.2023



/Когарко Л.Н.

Я, Сорохтина Наталья Владиславовна, согласна

на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой
диссертационного совета и дальнейшую их обработку.

20.01.2023

 /Сорохтина Н.В.