

на правах рукописи



Козлов Евгений Николаевич

**ГЕОХИМИЯ ФЕНИТОВ И АССОЦИИРУЮЩИХ С
НИМИ ПОРОД КОНТАКТОВОГО ОРЕОЛА
ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНОГО МАССИВА
ОЗЕРНАЯ ВАРАКА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)**

*Специальность 25.00.09 – геохимия, геохимические
методы поисков полезных ископаемых*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в **Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Мурманском государственном техническом университете** на *кафедре геологии и полезных ископаемых*.

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук
Владыкин Николай Васильевич
ФГБУН Институт геохимии СО РАН, заведующий лабораторией геохимии щелочных пород

доктор геолого-минералогических наук
Расс Ирина Теодоровна
ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится 23 декабря 2016 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.047.01 при Институте геологии и геохронологии докембрия РАН по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГГД РАН и на сайте www.ipgg.ru.

Отзывы направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2, ИГГД РАН. Факс: (812) 328-48-01. Электронная почта: dis.sovet@ipgg.ru.

Автореферат разослан октября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук



/Н.А. Алфимова/

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Контактные зоны щелочных интрузий – это уникальная природная лаборатория, позволяющая определить параметры метасоматических процессов, сопровождающих внедрение контрастных по составу расплавов на породы фундамента, оценить условия флюидной мобилизации, транспортировки и концентрирования крупноионных литофильных (LILE), высокозарядных (HFSE) и редкоземельных (REE) элементов, характерных для щелочных алумосиликатных и карбонатитовых магм. Сложность строения контактовых ореолов определяется многофазностью таких интрузий, обусловленной последовательным внедрением ультраосновных, щелочных и карбонатитовых магм. Если ультраосновные магмы ранних фаз внедрения оказывают на вмещающие породы в первую очередь термальное воздействие, то внедрение последующих щелочных магм и флюидизированных карбонатитовых расплавов сопровождается как преобразованием пород обрамления, так и значительным изменением состава внедряющегося расплава за счет активного метасоматического перераспределения вещества. При этом внедрение каждой последующей порции магмы и отделение от нее флюидной фазы сопровождается изменением ранее сформировавшихся фенитов. Большинство исследователей преимущественно изучались фениты, преобразованные в связи с формированием значительных объемов карбонатитов в комплексах Альнэ (Швеция), Фен (Норвегия), Калландер-Бэй (Канада) и др. В настоящей работе акцент ставится на изучении метасоматических пород, образованных на всех этапах становления массивов. Отдельной проблемой является анализ поведения редких элементов при образовании и преобразовании фенитизированных пород контактовых ореолов щелочно-ультраосновных комплексов, поскольку до настоящего момента систематических исследований не проводилось.

Цели и задачи исследования. Цель настоящего исследования состояла в расшифровке последовательности образования пород контактовых ореолов полифазных щелочно-ультраосновных карбонатитовых интрузий, оценке параметров метасоматического воздействия, сопровождавшего каждую из фаз внедрения, и определении поведения редких (LILE, REE, HFSE) на каждом этапе метасоматического преобразования приконтактных пород. В соответствии с данной целью решались следующие задачи:

(1) изучение петрографо-минералогических, геохимических и изотопных характеристик пород для установления этапности метасоматических процессов;

(2) определение комплекса минералогических, геохимических и изотопных индикаторов разновозрастного метасоматического воздействия с последующим формированием на основании этих индикаторов эталонной выборки проб, химический состав каждой из которых максимально отражает преобразование в ходе одного из выделенных метасоматических процессов;

(3) количественная оценка привноса-выноса как петрогенных, так и редких элементов по эталонным пробам для определения степени подвижности компонентов, направленности и масштаба их миграции на фойдолитовом, карбонатитовом и постмагматическом этапах метасоматической переработки;

(4) сопоставление полученных результатов с данными по другим комплексам, в том числе – по агапитовым нефелин-сиенитовым.

Объекты исследования. В соответствии с поставленной целью выбор объектов в составе Кольской щелочной провинции основывался на двух критериях: (1) породы контактового ореола интрузии должны быть минимально затронуты воздействием поздних фаз внедрения, прежде всего, карбонатитов; (2) хорошая обнаженность контактовых зон и/или наличие керна скважин, пересекающих зоны эндо- и экзоконтакта. Исходя из этого, наиболее подходящими объектами для исследования явились щелочно-ультраосновная интрузия Озерная Варака (основной объект), а также контактовые зоны Большого Ковдорского массива и нефелин-сиенитового массива Малый Ковдор.

Фактический материал, методы исследования и личный вклад автора. В основу диссертационной работы лег фактический материал, собранный автором при изучении контактовых ореолов интрузивов Озерная Варака, Большой и Малый Ковдор в ходе полевых работ 2012-2015 гг., включающий 176 образцов и проб, а также керна скважин, пересекающих зону контакта массива Озерная Варака. Для решения поставленных задач автором были определены плотности 45 образцов; исследованы более 300 петрографических шлифов и прозрачно-полированных препаратов; определено более 100 полных химических составов минералов (метод *ВДС*, Cameca MS-46, ГИ КНЦ РАН); снято 2 рамановских спектра волластонита (Horiba Jobin Yvon HR 800, РЦ «Геомодель», СПбГУ); для 3 навесок пироксена были записаны ЯГР-спектры (СМ-1201, ИГГД РАН); выполнены силикатные анализы 55 проб пород и минералов (ГИ КНЦ РАН); в 18 пробах определены концентрации 43 элементов-примесей (метод *ICP-MS*, ELAN 9000 DRC-e, ЦКП ИХТРЭМС КНЦ РАН); в 13 образцах карбонатитов установлены изотопные характеристики С и О (метод *EI*, Finnigan MAT DELTAPlus, ЦИИ ВСЕГЕИ); для 10 навесок пород и минералов определены Rb-Sr

изотопно-геохимические параметры (метод *TIMS*, МИ-1201-Т, ГИ КНЦ РАН); для 9 навесок – Sm-Nd характеристики (метод *TIMS*, Finnigan MAT 262 (RPQ), ГИ КНЦ РАН); для 4 монофракций клинопироксена и волластонита установлены изотопные составы и концентрации He из флюидных включений (метод *EI*, МИ-1201, ГИ КНЦ РАН).

Личный вклад автора заключается как в непосредственном участии во всех этапах исследования, от полевых работ до проведения аналитических мероприятий, так и в самостоятельной обработке и интерпретации всех полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертация объемом 278 страниц машинописного текста состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 316 наименований, содержит 70 рисунков и 43 таблицы.

Защищаемые положения:

1. *Породы контактового ореола интрузии Озерная Варака, а также других щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции подверглись полиметасоматической переработке в ходе трех последовательных процессов: фенитизации фойдолитового этапа, метасоматоза карбонатитового этапа и постмагматических преобразований, связанных с карбонатитогенезом. Несмотря на незначительное распространение в ряде массивов карбонатитов, метасоматоз карбонатитового этапа играл определяющую роль в приконтактовых изменениях докембрийских пород фундамента.*

2. *На всех этапах формирования контактовых ореолов щелочно-ультраосновных комплексов концентрирование в метасоматитах редкоземельных элементов, фосфора и, в меньшей степени, высокозарядных элементов происходило при их соосаждении с кальцием, железом и магнием в зонах базификации. Наиболее интенсивное накопление этих элементов осуществлялось на карбонатитовом этапе становления комплексов.*

3. *При внедрении щелочно-ультраосновных магм в докембрийские породы фундамента инъецировался значительный объем флюида, относительно бедного элементами-примесями. От агпатовых магм отделялось существенно меньшее количество фторидного флюида, эффективно экстрагировавшего высокозарядные и редкоземельные элементы из расплава и обогатившего указанными компонентами породы обрамления.*

Научная новизна. Впервые установлено, что контактово-метасоматическое воздействие, вызванное внедрением щелочно-ультраосновных магм, не сопровождалось значимым привнесом в обрамляющие породы большинства элементов-примесей, за исключением Ta и Nb. Таким образом, указанные компоненты не покидали щелочные расплавы и концентрировались в эндоконтактах интрузий. В контактовых зонах щелочно-ультраосновных массивов выявлены постмагматические метасоматические процессы (альбитизация, образование феррокарбонатитов), вызывающие эффективное разделение геохимически сходных элементов: ниобия и тантала, циркония и гафния, редкоземельных элементов иттриевой и цериевой групп. Установлено, что флогопитизация, наложенная на потенциально апатитоносные твейтозиты, ведет к снижению в последних содержания пентаоксида фосфора. Впервые показан механизм образования редкоземельных феррокарбонатитов за счет магматического замещения карбонатитовым расплавом алюмосиликатных пород на термальном пике карбонатитогенеза.

Практическая и теоретическая значимость работы. Установленные характеристики контактово-метасоматических процессов вносят вклад в понимание механизмов взаимодействия щелочных и карбонатитовых расплавов и флюидов с докембрийскими гранито-гнейсами как в плане расшифровки условий становления сложных полифазных щелочно-ультраосновных комплексов и связанных с ними карбонатитов, так и в плане оценки факторов, контролировавших миграцию и накопление таких экономически важных элементов, как Ta, Nb, Zr, Hf, REE и P, высоко востребованных в современной промышленности. Предложенный методический подход, основанный на комплексировании петрографо-минералогических исследований с результатами статистической обработки петрохимических данных, анализом распределения редких элементов, количественной оценкой привноса-выноса компонентов и изотопно-геохимическим моделированием, может быть рекомендован при проведении работ как на геологически сходных объектах, так и при изучении других полиметасоматических образований.

Апробация работы. Результаты исследований отражены в 3 статьях в журналах из списка ВАК, а также опубликованы в материалах и трудах международных и российских конференций (в том числе – в рецензируемых). Промежуточные результаты работы были представлены диссертантом на 8 конференциях: «Наука и образование» (Мурманск, 2012, 2013 и 2014); Всероссийской конференции, посвященной 150-летию академика Ф.Ю. Левинсона-Лессинга и 100-летию профессора Г.М. Саранчиной «Современные проблемы магматизма и метаморфизма»

(С.-Петербург, 2012); III Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (С.-Петербург, 2013); X Всероссийской Ферсмановской научной сессии (2013); XXIX и XXXI Международных конференциях «*Рудный потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма*» (Судак, 2012; Москва, 2014).

Благодарности. Автор глубоко признателен научному руководителю А.А. Арзамасцеву за постоянное внимание к работе, всестороннюю поддержку, а также любезно предоставленные материалы и уникальную возможность «погружения» в своеобразный мир щелочного магматизма. Настоящее исследование проводилось в соответствии с научными программами лаборатории геологии и геодинамики Арктики (№ 38) ГИ КНЦ РАН. Диссертант чрезвычайно признателен сотрудникам лабораторий ГИ КНЦ РАН №№ 29, 33, 48 и отдела «Шлифовальная мастерская» за осуществление пробоподготовки и всестороннего анализа вещества, а также персонально А.В. Базай, Т.Б. Баяновой, О.Б. Дудкину, И.Л. Каменскому, Л.И. Коваль, Н.Е. Козлову, Л.И. Константиновой, Е.В. Мартынову, В.В. Пухе, Е.А. Селивановой, М.Ю. Сидорову, В.И. Скибе, А.А. Стафоркину, Д.Г. Степенчикову, М.Г. Тимофеевой, М.В. Тороповой, Е.Н. Фоминой (ГИ КНЦ РАН), Н.М. Королеву (ИГГД РАН), И.Р. Елизаровой (ИХТРЭМС КНЦ РАН). Всем названным лицам и коллективам автор выражает самую искреннюю благодарность, выполнение настоящего исследования было бы невозможно без их бесценного труда. Отдельную благодарность автор выражает С.А. Бушмину (ИГГД РАН) и А.Б. Кольцову (СПбГУ) за ценные замечания, которые помогли улучшить первоначальный вариант рукописи. Особую признательность диссертант выражает своему университетскому наставнику К.И. Лохову (СПбГУ), привившему скрупулезность в работе с фактическими материалами и навыки анализа изотопных данных.

Исследования получили финансовую поддержку со стороны РФФИ (гранты № 12-05-00244а и № 15-35-50265).

ГЕОЛОГИЯ КОНТАКТОВЫХ ОРЕОЛОВ ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНЫХ МАССИВОВ КОЛЬСКОЙ ПРОВИНЦИИ

В состав девонской Кольской щелочной провинции входит более 20 интрузивов различного размера, а также множество дайковых роев и диатрем, располагающихся на территории Кольского региона и Финляндии. Вокруг большинства массивов провинции наблюдаются относительно мощные ореолы контактово-измененных пород, ширина которых составляет от сотен метров до первых километров. Наименьшие

объемы фенитизированных пород установлены вокруг массива Африканда, сложенного преимущественно оливинитами и пироксенитами (в том числе нефелиновыми), и вблизи оливинитовой интрузии Лесная Варака. Выполненные автором полевые наблюдения и петрографо-минералогическое изучение пород контактовых ореолов данных массивов свидетельствуют о незначительности флюидной переработки обрамляющих пород, по всей видимости они испытали преимущественно термальное воздействие от внедрения магм ультраосновных составов.

Мощность контактовых ореолов щелочно-ультраосновных комплексов коррелируется с тем, насколько широко в них представлены фойдолиты (Кухаренко и др., 1965). Так, вокруг массива Ковдор, периферическую зону которого слагают ийолиты и мельтейгиты, ширина контактового ореола достигает нескольких километров. На этом объекте были изучены породы северо-восточного фланга массива, удаленные от «карбонатитового ядра» комплекса. В пределах этого участка вблизи контакта с фойдолитами строение фенитового ореола сходно со строением контактовой зоны массива Озерная Варака, описанной ниже. Локально структура контактового ореола усложнена за счет метасоматического воздействия на фенитизированные породы со стороны сателлита Большого Ковдора – нефелин-сиенитового массива Малый Ковдор, вокруг которого был сформирован собственный комплекс фенитов.

Массив Озерная Варака, выбранный в качестве основного объекта изучения, расположен в зоне сочленения Беломорского мегаблока и Имандра-Варзугского палеопротерозойского пояса (юг Кольского полуострова). Вмещающие породы представлены биотит-олигоклазовыми гнейсами беломорского комплекса, среди которых в подчиненном количестве присутствуют биотит-амфиболовые гнейсы и гранат-плагиоклазовые амфиболиты. Возраст биотит-олигоклазовых гнейсов $2\,723 \pm 17$ млн. лет (Ризванова и др., 1994). Центральную часть массива слагают щелочные ультрамафиты, главным образом нефелиновые пироксениты и мельтейгиты (Рис. 1). Возраст формирования пород данного комплекса 383 ± 6 млн. лет (Arzamastsev, Wu, 2014). Они окружены широким кольцом фойдолитов второй фазы внедрения (преимущественно – ийолитов), занимающим более 60 % площади интрузии на современном эрозионном срезе. Возраст ийолитов 374 ± 5 млн. лет (там же). К третьей фазе внедрения отнесены канкринит-нефелиновые сиениты, представленные в виде немногочисленных жил, секущих пироксениты и фойдолиты. Определенный для них возраст сходен с возрастом ийолитов (374.3 ± 4.0 млн. лет, Kramm et al., 1993). Наиболее поздними породами массива являются карбонатиты (преимущественно кальцитовые), наблюдаемые в виде жильных и штокообразных тел. Для образца карбонатита получена датировка 369.6 ± 5.3 млн. лет (там же).

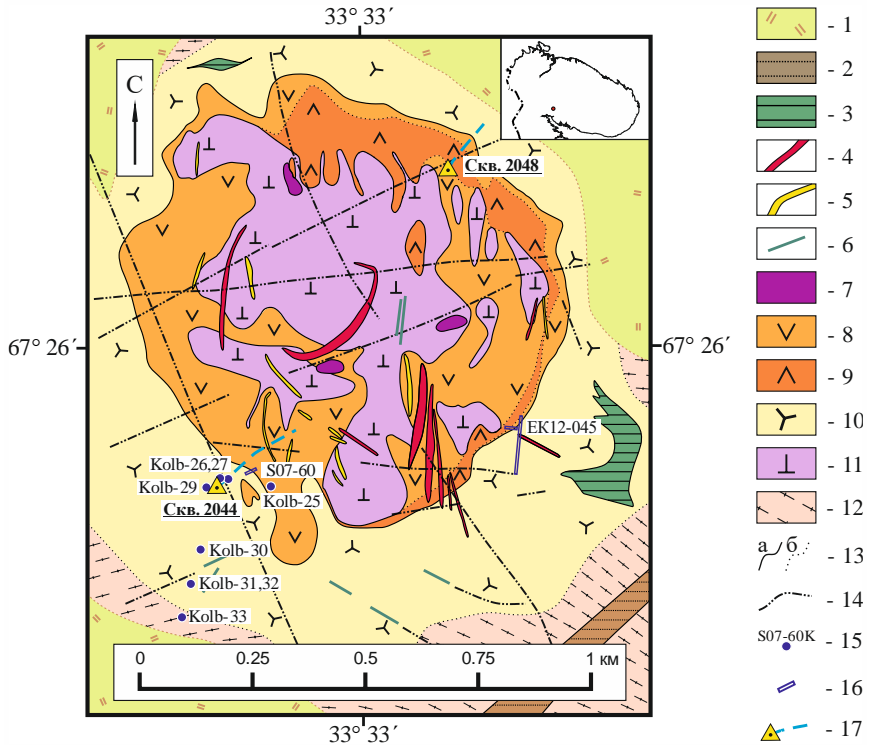


Рис. 1. Схема геологического строения щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса Озерная Варака по данным МГРЭ (Мамонтов и др., 1996) и работам (Дудкин и др., 1980; Арзамасцев и др., 2009а); на врезке – положение массива на схеме Кольского полуострова.

Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – халцедоновые брекчии в зонах дробления; 3 – брекчии фенитов с эгирин-альбитовым цементом; 4 – карбонатиты; 5 – канкринит-нефелиновые сиениты; 6 – дайковый комплекс (мончикиты, ийолит-порфиры, тингуаиты); 7 – щелочные пегматоиды с перовскитом; 8 – ийолиты; 9 – мельтейгиты; 10 – фениты и фенитизированные гнейсы нерасчлененные; 11 – пироксениты; 12 – биотит-олигоклазовые гнейсы; 13 – геологические границы: резкие (а), постепенные (б); 14 – разрывные нарушения; 15 – точки отбора проб; 16 – местоположения деталей участков; 17 – местоположения устьев скважин и проекции их стволов на земную поверхность.

При небольших размерах самой интрузии площадь, занимаемая экзоконтактовыми метасоматитами, сопоставима с площадью интрузивных образований (см. Рис. 1). Полевые и камеральные исследования показали, что основной объем обрамляющего массив контактового ореола слагают синмагматические щелочные метасоматиты, сформировавшиеся на фойдолитовом этапе становления комплекса по докембрийским олигоклаз-биотитовым гнейсам. Они представлены двумя разновидностями пород, закономерно сменяющимися по направлению к интрузиву: фенитизированными гнейсами и бескварцевыми клинопироксен-полевошпатовыми фенитами. При этом фениты* присутствуют в резко подчиненном объеме, слагая зону шириной первые десятки метров в непосредственной близости от контакта интрузива.

Фенитизированные гнейсы представляют собой кварцсодержащие существенно полевошпатовые породы с содержанием новообразованных минералов 30-60 об.%. Метасоматические изменения гнейсов выражаются в развитии амфибол-пироксеновых псевдоморфоз по биотиту и клинопироксеновых кайм вокруг зерен кварца, а также в замещении олигоклаза и биотита альбит-калишпатовым агрегатом. При переходе от фенитизированных гнейсов к бескварцевым **клинопироксен-полевошпатовым фенитам** породы утрачивают гнейсовидность, текстура становится грубополосчатой, с чередованием лейко- (существенно полевошпатовых) и меланократовых (со значительным содержанием эгирин-авгита) слоев. На уровне минерального состава переход фиксируется по исчезновению кварца, олигоклаза, биотита и щелочных амфиболов, изменению состава клинопироксена, увеличению содержания К- и Na-полевых шпатов.

Наряду с метасоматитами фойдолитового этапа в пределах экзоконтактового ореола массива установлено присутствие пестрого набора более поздних разновозрастных метасоматитов, из которых наибольшее распространение имеют альбитизированные и волластонит-клинопироксеновые породы. В пределах участков развития **альбитизированных пород** среди фенитов наблюдаются лейкократовые

* В первоначальном понимании под фенитами подразумевались лейкократовые породы из обрамления ийолитов и мельтейгитов, сформировавшиеся метасоматическим путем по кислому протолиту (Brögger, 1921). К данному моменту границы термина расширены за счет отнесения к этому типу пород метасоматитов, сформировавшихся (а) по протолитам другого состава и (б) под действием флюидов из карбонатитовых или апайтовых нефелин-сиенитовых магм. В настоящей работе термин «фениты» используется в его современном понимании, однако предметом исследования являются метасоматиты в границах термина, предложенных Б.Г. Брэггером.

жилы, прожилки, гнезда, сложенные преимущественно альбитом (75-80 об.%) и калиевым полевым шпатом (15 об.%), с подчиненным содержанием эгирин-авгита (5-10 об.%). Характерной чертой пород альбитизированных участков является заметное снижение содержания клинопироксена, вплоть до его полного исчезновения. Помимо того, резко снижается содержание типичных акцессорных минералов апогнейсовых фенитов – апатита и титанита. Зона **волластонит-клинопироксеновых пород** мощностью первые метры установлена на юго-западном фланге массива непосредственно в контакте ийолитов с фенитизированными породами обрамления. Граница с приконтактовыми ийолитами резкая, секущая. Волластонит-клинопироксеновые породы характеризуются неоднородностью текстуры, обусловленной наличием в эгирин-авгитовом матриксе множества волластонитовых прожилок, шлиров и гнезд, в которых наблюдается до 10 об.% апатита. Примыкающие со стороны обрамления фениты пронизаны сетью тонких жилок, сложенных волластонитом, клинопироксеном, кальцитом, апатитом и титанитом.

Кроме того, в пределах контактового ореола установлено присутствие трех разновидностей карбонатитов и силикокарбонатитов, различающихся по морфологии тел и вещественному составу. Две разновидности представлены монокарбонатными кальциокарбонатитами и одна – поликарбонатными феррокарбонатитами. Кальцитовые карбонатиты, в свою очередь, делятся по своим структурным особенностям на мелко- и среднезернистые альвикиты и крупно- и гигантозернистые сёвиты. **Альвикиты** слагают маломощные ветвящиеся жилы, окруженные фенитизированными породами, претерпевшими еще один этап метасоматической переработки. Мощность жил лишь в редких случаях составляет более метра. Данные породы сложены несколькими минеральными ассоциациями: **(Ia)** [Cal + Wo + Hd + Nph + Anr(Ti)], **(Iб)** [Cal + Hd + Anо ± Wo] и **(II)** [Cal + Aeg-Aug ± Phl]. Основными акцессорными минералами для всех трех ассоциаций являются апатит и титанит. Во всех ассоциациях кальцит – доминирующий минерал, остальные минеральные фазы наблюдаются в переменном количестве. Метасоматическая зональность вокруг жил альвикитов следующая (от оси жил): кальцитовый карбонатит → клинопироксен-кальцитовая порода → зона **твейтозитов** (основных метасоматитов, преимущественно – кальцит-клинопироксеновых ± нефелин ± биотит) → зона щелочных метасоматитов (альбитизированных пород). Вторую разновидность карбонатитов (**сёвиты**) составляют крупно- и гигантозернистые анхимономинеральные кальцитовые породы, слагающие достаточно мощные (до 3 м в крест простирания) дайкоподобные тела. Их минеральный состав однороден и соответствует составу альвикитов-II: Cal (95-98 об.%) + Aeg-Aug + Phl (в сумме – 2-5 об.%). Данные карбонатиты

изучены на юго-восточном фланге массива, где они приурочены к единой зоне шириной 30 метров. В пределах этой зоны фенитизированные гнейсы преобразованы в метасоматиты, сходные по минеральному составу с фенитами фойдолитового этапа. Самыми поздними из исследованных карбонатитов являются интенсивно ожелезненные поликарбонатные породы (***феррокарбонатиты***), секущие в виде единичных маломощных (первые дециметры) прожилков и жил замещения альвикиты-Ia и Ib. На метасоматическую «апоальвикитовую» природу данных образований указывает широкое развитие разнообразных псевдоморфоз, например – замещение клинопироксена анкерит-сидеритовым агрегатом, титанита – кварцем, карбонатами и рутилом и др.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. *Породы контактового ореола интрузии Озерная Варака, а также других щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции подверглись полиметасоматической переработке в ходе трех последовательных процессов: фенитизации фойдолитового этапа, метасоматоза карбонатитового этапа и постмагматических преобразований, связанных с карбонатитогенезом. Несмотря на незначительное распространение в ряде массивов карбонатитов, метасоматоз карбонатитового этапа играл определяющую роль в приконтактных изменениях докембрийских пород фундамента.*

Минералогия пород контактового ореола. Петрографо-минералогическое исследование позволило выделить ряд «сквозных» минералов, установленных в различных типах метасоматитов экзоконтакта. К таковым относятся клинопироксен, щелочные полевые шпаты, апатит, титанит. Для каждой из перечисленных минеральных фаз было определено присутствие нескольких генераций. В качестве реперного минерала был использован клинопироксен, для которого на примере контактовых ореолов многих щелочно-ультраосновных комплексов (Mogogan, 1994; Метасоматизм ..., 1998) показано присутствие в фенитизированных породах двух сменяющихся генераций, каждой из которых соответствует специфический тренд изменения состава. При этом появление раннего (диопсид – эгирин-авгитового) тренда связано с воздействием флюида из ийолитового источника, а позднего (геденбергит – эгирин-авгитового) – с метасоматозом карбонатитового этапа. Клинопироксены контактового ореола массива Озерная Варака также принадлежат двум генерациям, составы которых на тройной диаграмме в координатах Di (диопсид) – Aeg (эгирин) – Hd (геденбергит) легли на два непересекающихся тренда (Рис. 2А).

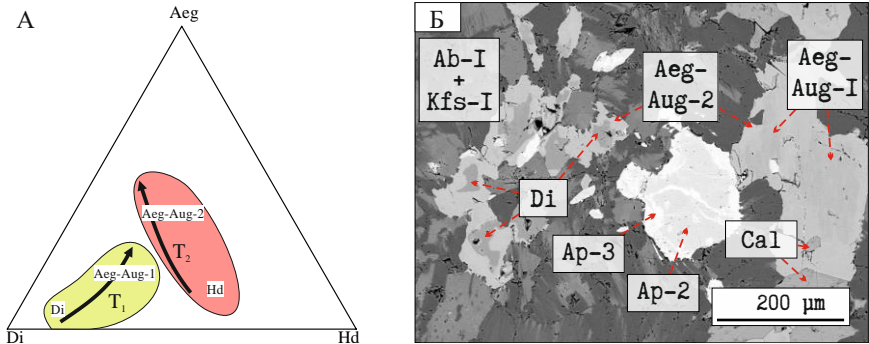


Рис. 2. (А) Составы клинопироксенов из пород контактового ореола массива Озерная Варака на диаграмме в координатах Di (диопсид) – Aeg (эгирин) – Hd (геденбергит) и (Б) пример микроструктурных взаимоотношений клинопироксенов диопсид–эгирин-авгитового (Di, Aeg-Aug-1) и геденбергит–эгирин-авгитового (Aeg-Aug-2) трендов.

Первый тренд описывается одновременной реализацией двух основных схем изоморфного замещения: $^{M1}\text{Mg}^{2+} \rightleftharpoons ^{M1}\text{Fe}^{2+}$ и $^{M2}\text{Ca}^{2+} + ^{M1}\text{Mg}^{2+} \rightleftharpoons ^{M2}\text{Na}^+ + ^{M1}\text{Fe}^{3+}$, второй – схемой изоморфизма $^{M2}\text{Ca}^{2+} + ^{M1}\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons ^{M2}\text{Na}^+ + ^{M1}\text{Fe}^{3+}$. Общей чертой клинопироксенов первого тренда является заметная обогащенность Ca и Mg при меньших концентрациях Mn по сравнению с клинопироксенами второго тренда. В ряде образцов фенитов установлено совместное нахождение клинопироксенов, принадлежащих различным трендам. В таких случаях наблюдаются однозначные микроструктурные соотношения: центральные участки зерен слагает диопсид или ранний эгирин-авгит (Aeg-Aug-1) первого тренда, а каймы в обоих случаях – поздний эгирин-авгит (Aeg-Aug-2) второго тренда (Рис. 2Б). Выявленные разновозрастные генерации щелочных полевых шпатов разделились как по значению K/Na отношения, так и по концентрациям Ba и Sr; генерации апатита – по содержаниям Sr и REE; титанита – по величине Fe/Al отношения и содержания примесных компонентов (Fe, Al, Na, Nb, Zr, REE). В конечном итоге проведенные исследования породообразующих и акцессорных минералов метасоматитов контактового ореола массива Озерная Варака позволили на основании наблюдаемых закономерностей их локализации в данных породах, особенностей химического состава минералов и их микроструктурных взаимоотношений выделить несколько парагенезисов, отвечающих трем циклам метасоматической переработки (Таблица). При этом, несмотря на малую распространенность карбонатитов в пределах массива Озерная Варака, минералы «карбонатитового» парагенезиса в тех или иных количествах присутствуют практически во всех исследованных образцах.

Таблица. Составы выделенных минеральных парагенезисов в породах экзоконтакта массива Озерная Варака

Парагенезис:	Фенитизированный гнейс	Фенит	Волластонит-клинопироксеновая порода	Карбонатит	Альбитизированная порода
<i>протолита</i>	[Qz], [Pl], [Mc], [Bt-1]	—	—	—	—
<i>«фенитовый»</i>	Ab-1, Kfs-1, Ttn-1, [Frct]	Ab-1, Kfs-1, Aeg-Aug-1, Ap-1, Ttn-1, [Di], [Ano-1]	Aeg-Aug-1, Ap-1, [Ano-1]	—	Ab-1, Kfs-1, [Aeg-Aug-1]
<i>«карбонатитовый»</i>	Hd	Aeg-Aug-2, Cal, Ap-2, Ttn-2, [Nph]	Wo, Cal, Ap-2	Wo, Cal, Hd, Aeg-Aug-2, Nph, Ano-2, Ap-2, Ttn-2, Anr(Ti)	[Aeg-Aug-2], [Cal], Ap-2
<i>постмагматический</i>	—	Bt-2, Ab-2, Kfs-2, Ccn, Zeo, Ap-3, Ttn-3	—	Qz, Kln, Ank, Sd, Dol, Ap-3, Ttn-3	Ab-2, Kfs-2, Ap-3

Примечание. Qz – кварц; Pl – олигоклаз; Mc – микроклин; Ab – альбит; Kfs – калиевый полевой шпат; Ano – анортклаз; Nph – нефелин; Bt – биотит; Frct – феррорихтерит; Hd – геденберgit; Di – диопсид; Aeg-Aug – эгирин-авгит; Wo – волластонит; Anr(Ti) – гранат; Ttn – титанит; Ap – апатит; Cal – кальцит; Ank – анкерит; Sd – сидерит; Dol – доломит; Ccn – канкринит; Zeo – цеолиты; Kln – каолинит. В квадратных скобках указаны фазы подвергшиеся коррозии и/или замещению.

Петрогенные компоненты. Выборка составов пород экзоконтакта массива Озерная Варака была проанализирована с помощью дискриминантного анализа (ДА) и метода главных компонент (МГК). Результаты ДА показали, что при переходе от одной разновидности алюмосиликатных пород экзоконтакта к другой происходит скачкообразное изменение петрохимических характеристик. При этом наибольший вклад в распознавание исследовавшихся разновидностей алюмосиликатных пород контактового ореола вносят Na_2O и Al_2O_3 . По концентрации Na_2O гранито-гнейсы и сформировавшиеся по ним щелочные метасоматиты фойдолитового этапа (фениты и фенитизированные гнейсы) разбиваются на три группы, отвечающие зонам колонки фенитизации: при возрастании интенсивности метасоматической переработки, то есть при переходе от протолита (гранито-гнейсов) через фенитизированные гнейсы к клинопироксен-полевошпатовым фенитам, содержание Na_2O дискретно возрастает.

В то же время неизменные гранито-гнейсы и щелочные метасоматиты фойдолитового этапа четко отличаются по своим петрогеохимическим характеристикам от более поздних метасоматитов: твейтозиты обеднены относительно ранних щелочных метасоматитов как Na_2O , так и Al_2O_3 , а альбитизированные породы напротив – обогащены. Это позволяет сделать заключение о том, что в процессе метасоматической переработки карбонатитового этапа оба компонента выносились из ранних щелочных метасоматитов, преобразованных в твейтозиты, и переотлагались в зоне вторичного ощелачивания (альбитизации).

Использование МГК также выявило влияние на петрогеохимические характеристики пород контактового ореола трех метасоматических процессов. **Метасоматоз фойдолитового этапа** оказал противоположное воздействие на $[\text{Na}_2\text{O}, \text{CO}_2]$, с одной стороны, и SiO_2 – с другой. Геохимически это описывается двумя сопряженными процессами: накоплением Na на фоне высокого потенциала CO_2 и одновременным выносом SiO_2 (натриевым щелочным метасоматозом). **Метасоматоз карбонатитового этапа** выразился в формировании по ранним щелочным метасоматитам двух типов пород: (1) базификатов (твейтозитов, волластонит-клинопироксеновых пород и др.), в которые привносились $[\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg}, \text{Ti}, \text{P}, \text{F}, \text{S}, \text{CO}_2, \text{Cl}]$ и из которых выносились $[\text{Na}, \text{K}, \text{Al}, \text{Si}]$, и (2) альбитизированных пород, в которые привносилась вторая группа элементов. Это подтверждает вывод о комплементарности твейтозитов и альбитизированных пород. Применение МГК позволило выявить еще один **посткарбонатитовый процесс**: калиевый щелочной метасоматоз при высоком потенциале F, которому подверглись твейтозиты. На минерлогическом уровне этот процесс выражен в биотитизации твейтозитов при одновременном снижении в них содержания кальцита и апатита.

Изотопные индикаторы. Как показали модельные расчеты, изотопный состав стронция и неодима исследованного твейтозита $[\text{}^{87}\text{Sr}/\text{}^{86}\text{Sr}_{(369)} = 0.7049, \varepsilon_{\text{CHUR}}^{369}(\text{Nd}) = +0.3]$ представляет собой продукт простого «механического» смешения вещества из карбонатитового источника $[\text{}^{87}\text{Sr}/\text{}^{86}\text{Sr}_{(369)} = 0.7032, \varepsilon_{\text{CHUR}}^{369}(\text{Nd}) = +2.7]$ и фенита $[\text{}^{87}\text{Sr}/\text{}^{86}\text{Sr}_{(369)} = 0.7254, \varepsilon_{\text{CHUR}}^{369}(\text{Nd}) = -9.3]$. Таким образом, анализ Rb-Sr и Sm-Nd изотопных характеристик пород контактового ореола массива Озерная Варака подтвердил предположение о том, что базификация карбонатитового этапа является процессом, наложенным на ранний щелочной метасоматоз фойдолитового этапа.

Поздние метасоматические процессы (образование феррокарбонатов, биотитизация твейтозитов) сопровождалась активным участием корового флюида, равновесного с архейскими гнейсами обрамления и

характеризующегося чрезвычайно высоким Sr/Nd отношением. Влияние этого метасоматического агента прослеживается в увеличении относительно протолитов значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ без воздействия на Sm-Nd изотопную систему.

Результаты изучения изотопного состава гелия позволяют заключить, что надкритический раствор, вызвавший щелочной метасоматоз фойдитового этапа (фенитизацию), поступал непосредственно из магматического резервуара. Это определило высокое содержание «мантийного» He во флюидных включениях, захваченных минералами «фенитового парагенезиса»: $^3\text{He}/^4\text{He} = 5.9 \times 10^{-6}$, что отвечает 49 % «мантийной» составляющей. Флюид, вызвавший базификацию на карбонатитовом этапе, транспортировался из корневой части магматической системы по системам трещин и зонам дробления, что и фиксируется в контаминации коровой компонентой: $^3\text{He}/^4\text{He} = 0.5 \times 10^{-6}$ (3-4 % «мантийной» составляющей) во флюидных включениях из минералов «карбонатитового парагенезиса».

Таким образом, выявленные в ходе комплексного минералогеохимического исследования признаки указывают на преобразование пород контактового ореола интрузива Озерная Варака в ходе трех циклов метасоматической переработки, каждый из которых сопровождался формированием собственного парагенезиса минералов. При этом между выделенными этапами метасоматического воздействия происходила смена источников флюидных фаз, геохимической направленности метасоматических преобразований и механизмов миграции флюидных потоков.

Второе защищаемое положение. *На всех этапах формирования контактовых ореолов щелочно-ультраосновных комплексов концентрирование в метасоматитах редкоземельных элементов, фосфора и, в меньшей степени, высокозарядных элементов происходило при их соосаждении с кальцием, железом и магнием в зонах базификации. Наиболее интенсивное накопление этих элементов осуществлялось на карбонатитовом этапе становления комплексов.*

Для определения направленности миграции химических компонентов при образовании различных метасоматитов контактового ореола массива Озерная Варака и оценки масштабов массопереноса был произведен количественный расчет привноса-выноса компонентов по методике Р.Л. Грizenса (Gresens, 1967; Grant, 1986). Моделирование показало, что в колонке фенитизации (метасоматоза фойдитового этапа) массива Озерная Варака присутствуют (1) зона базификации, то есть преимущественного накопления двухвалентных оснований (Ca, Mg, Fe) и выноса Si на фоне высокой активности щелочей, задаваемой специфическим

составом метасоматизирующего флюида (представлена клинопироксен-полевошпатовыми фенитами); (2) зона собственно щелочного метасоматоза, сопровождавшегося выносом как кислотных компонентов (Si, Al), так и двухвалентных оснований (сложена фенитизированными гнейсами); (3) зона кислотного воздействия (участки прожилкового окварцевания среди неизменных гнейсов). При формировании базификатов карбонатитового этапа, также как и при образовании фенитов, происходило накопление Ca, Fe, Mg, а также Mn и P, однако вместе с кислотными компонентами (Si, Al) активно выносились и щелочи. Поздние метасоматиты (альбитизированные породы, феррокарбонатиты, биотитизированные твейтозиты) представляют собой продукт преимущественного выноса компонентов, как петрогенных, так и малых. Во всех случаях выносились Ca, Ti, P, что подтверждает результаты МГК. При этом состав привнесенного вещества соответствует модельному составу вещества, вынесенного при базификации карбонатитового этапа (Na, K, Si, Al).

Расчеты показали, что редкоземельные элементы на фойдолитовом этапе становления комплекса были малоподвижными, и при отделении флюида от щелочно-ультраосновной магмы они преимущественно оставались в расплаве. Незначительный привнос REE определен лишь для клинопироксен-полевошпатовых фенитов. При базификации карбонатитового этапа редкоземельные элементы, напротив, очень активно мигрировали с флюидом в обрамляющие породы. Процессы «постмагматического» метасоматоза сопровождались выносом всего спектра REE, причем при альбитизации более активно терялись редкоземельные элементы иттриевой группы, а при образовании феррокарбонатитов – цериевой. Таким образом, привнос REE, а также P и HFSE, установлен для базификатов фойдолитового и карбонатитового этапов метасоматической переработки (фенитов, волластонит-клинопироксеновых пород, твейтозитов), то есть накопление элементов данных групп происходило совместно с двухвалентными основаниями (Ca, Fe, Mg, Mn, Sr).

Проведенное исследование показало, что наблюдающаяся обогащенность пород контактового ореола REE вызвана в первую очередь наложенным основным метасоматозом карбонатитового этапа. Кроме того, было установлено, что наиболее богатые HFSE и REE из всех исследованных пород массива альвикиты-Ia и Ib также являются продуктом контактового взаимодействия, а точнее – магматического замещения карбонатитовой жидкостью фенитизированных пород. Признаками гибридного происхождения альвикитов-I, помимо прочих, являются их обогащенность титанитом (Wall *et al.*, 1997; Barker, 2001), а также то, что фигуративные точки изотопных составов Sr и Nd данных пород легли на ту же гиперболу смещения «сёвит–фенит», что и твейтозит.

Взаимодействие осуществлялось реакционным путем, что отражено в «облегчении» изотопного состава углерода от относительно низкотемпературных сёвитов и альвикитов-II [$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB}) = -3.7 \dots -4.2 \text{‰}$] через анортоклазовые альвикиты-Iб [$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB}) = -5.1 \dots -5.2 \text{‰}$] к наиболее высокотемпературным нефелиновым альвикитам-Iа [$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB}) = -6.3 \text{‰}$] (Рис. 3). Наблюдаемый изотопный сдвиг объясняется механизмом релейской дистилляции. В его свете более «легкий» изотопный состав углерода альвикитов-Iа по отношению к Iб является закономерным: при образовании последних не происходило преобразования щелочных полевых шпатов в нефелин, а значит, высвобождалось меньшее количество свободного кремнезема и, как следствие, реакция $\text{Cal} + \text{Qz} \rightleftharpoons \text{Wo} + \text{CO}_2$ шла менее интенсивно. В ходе рассматриваемого взаимодействия, протекавшего, согласно проведенному исследованию, в рамках модели AFC (DePaolo, 1981), карбонатный расплав динамично накапливал, по меньшей мере, Sr и Nd (а опираясь на результаты масс-баланса, – и остальные REE, и HFSE), что и определило возникновение выявленной изотопно-геохимической специфики данных пород. При этом должна была отделяться дополнительная фаза, обогащенная Fe, Mg, Sr и REE, по составу отвечающая редкоземельным карбонатитам, присутствующим во многих комплексах Кольской провинции (Zaitsev *et al.*, 2014).

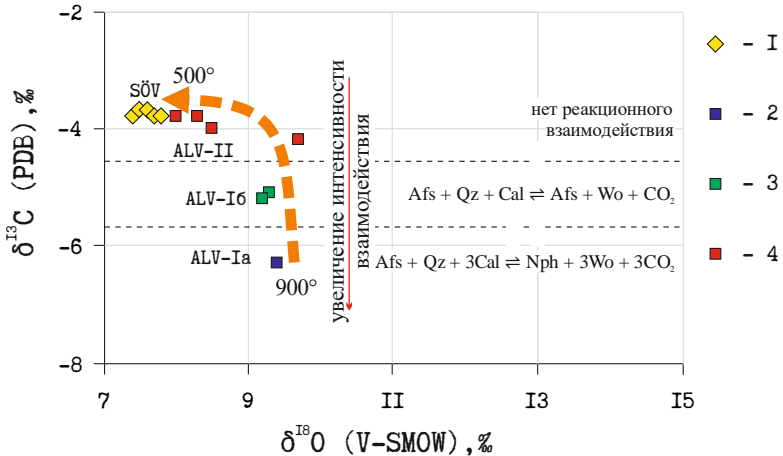


Рис. 3. Положение фигуративных точек кальцитовых карбонатов из контактового ореола массива Озерная Варак на диаграмме рассеивания в координатах $\delta^{18}\text{O} (\text{V-SMOW}) - \delta^{13}\text{C} (\text{PDB})$. Условные обозначения: 1 – сёвит; 2 – альвикит-Ia; 3 – альвикит-Iб; 4 – альвикит-II. Рыжая пунктирная стрелка показывает путь термальной эволюции кальцитовых карбонатитов. На схематических реакциях взаимодействия *Afs* – щелочной полевой шпат, *Qz* – кварц, *Cal* – кальцит, *Wo* – волластонит, *Nph* – нефелин.

Таким образом, установленная обогащенность пород контактовой зоны массива Озерная Варака редкоземельными элементами обусловлена в первую очередь вовлечением вещества из карбонатитового источника и его взаимодействием с уже сформировавшимися на тот момент фенитизированными породами фойдолитового этапа.

Третье защищаемое положение. *При внедрении щелочно-ультраосновных магм в докембрийские породы фундамента инжецировался значительный объем флюида, относительно бедного элементами-примесями. От агпаитовых магм отделялось существенно меньшее количество фторидного флюида, эффективно экстрагировавшего высокозарядные и редкоземельные элементы из расплава и обогатившего указанными компонентами породы обрамления.*

Для сопоставления процессов фенитизации гранито-гнейсов вокруг щелочно-ультраосновных и агпаитовых нефелин-сиенитовых массивов были изучены породы северо-восточного фланга массива Ковдор. В пределах исследованного разреза гнейсы чупинской свиты беломорского комплекса были изменены под воздействием флюидов из двух источников. Первым источником послужили щелочно-ультраосновные расплавы, образовавшие ийолиты Большого Ковдора, вторым – агпаитовые магмы, при раскристаллизации которых сформировались ювиты и полевошпатовые ийолиты массива Малый Ковдор (коэффициент агпаитности ювитов $(K+Na)/Al = 1.25$). Петрографическое исследование выявило отсутствие признаков наложенного на породы данного участка карбонатитового метасоматоза. Согласно результатам масс-баланса, фенитизированные гнейсы Ковдора, измененные под действием фойдолитового источника, как и аналогичные породы Озерной Вараки, являются породами зоны щелочного метасоматоза с преимущественным выносом компонентов (в первую очередь – Si). Сходство между фенитизированными гнейсами двух комплексов проявлено на уровне как петрогенных, так и редких элементов (Рис. 4А,Б). Тем временем модельные расчеты показали, что для фенитов из обрамления агпаитовых нефелин-сиенитовых пород Малого Ковдора как абсолютные, так и относительные значения привноса HFSE и REE значимо превышают те же величины в фенитах щелочно-ультраосновного комплекса Озерная Варака (Рис. 4В,Г). При этом по абсолютным значениям привноса Nb, Ta и REE фениты Малого Ковдора аналогичны фенитам Хибин и Ловозера (Арзамасцев и др., 2011), хотя ювиты Малого Ковдора по содержаниям HFSE и REE значительно уступают как приконтактовым сиенитам Хибин и Ловозера, так и ийолитам Озерной Вараки.

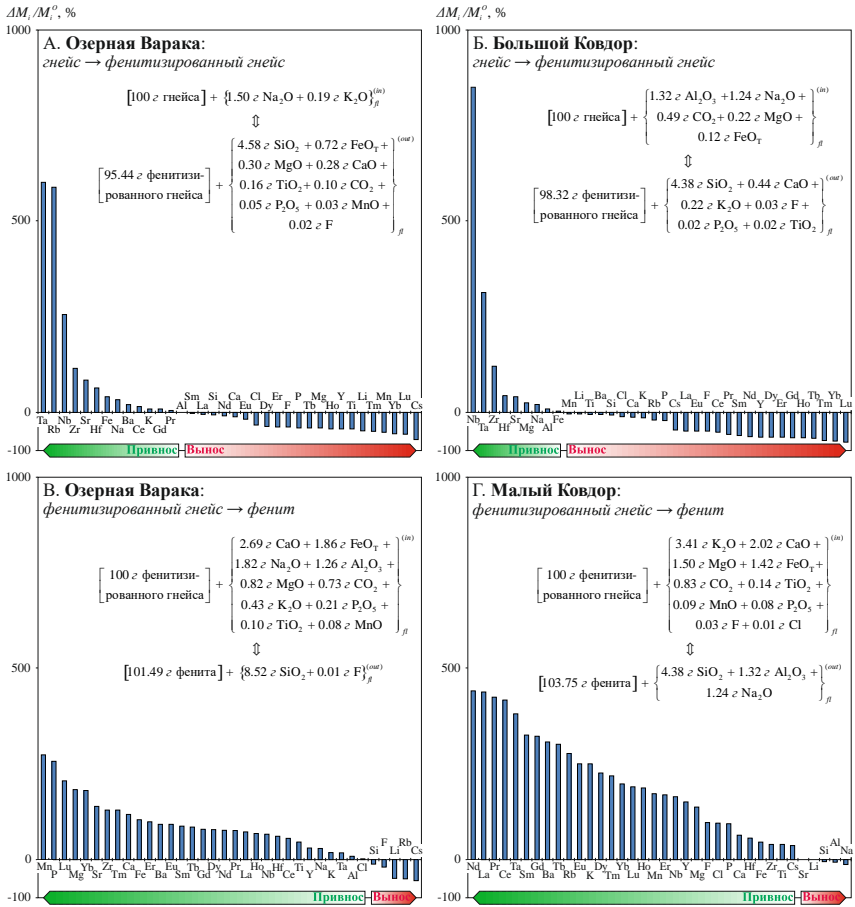


Рис. 4. Рассчитанное изменение масс компонентов относительно их масс в протолите ($\Delta M_i/M_i^0$, в %) для моделей (А, Б) образования фенитизированных гнейсов по неизменным биотит-олигоклазовым гнейсам и (В, Г) клинопироксен-полевошпатовых фенитов по фенитизированным гнейсам в обрамлении массивов (А, В) Озерная Варака, (Б) Большой и (Г) Малый Ковдор.

В совокупности с прочими специфическими чертами «нефелин-сиенитовых фенитов» (малой мощностью слагаемых ими контактовых ореолов, обогащенностью этих пород фтором и др.) и в свете имеющихся представлений о возможности перехода от агпайтового силикатного расплава к остаточному концентрированному фторидному рассолу, способному эффективно экстрагировать редкоземельные и высокозарядные элементы (Когарко, 1977; Rubín *et al.*, 1993; Граменицкий и др.,

2005) полученные результаты позволяют сделать заключение о разнице в составах фенитизирующих агентов и в объемах флюидных фаз, отделившихся от щелочно-ультраосновных и агпайтовых магм, родоначальных для рассмотренных комплексов.

Интерес представляет установленное увеличение роли калия в контактовом процессе, вызванном внедрением агпайтовых расплавов. Это выражается в смене натрового типа щелочности, обычного для фенитизации вблизи щелочно-ультраосновных комплексов, калий-натриевым и калиевым, что делает рассматриваемый процесс потенциально рудоносным в отношении REE и HFSE (Владыкин, 2013).

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

1. **Козлов, Е.Н.**, Арзамасцев, А.А., Базай, А.В. Типохимизм минералов и пород контактовых ореолов щелочно-ультраосновных комплексов как индикатор полиметасоматической переработки: на примере массива Озерная Варака (Кольский полуостров) // *Вестник МГТУ*. 2014. Т.17. №2. С. 286–303.
2. **Козлов, Е.Н.**, Арзамасцев, А.А. Петрогенезис метасоматитов зон фенитизации щелочно-ультраосновного комплекса Озерная Варака (Кольский п-ов) // *Петрология*. 2015. Т.23. №1. С. 50–74.
3. **Козлов, Е.Н.** Использование метода главных компонент для изучения процессов полиметасоматоза в контактах карбонатитовых комплексов Кольского полуострова // *Вестник МГТУ*. 2015. Т.18. №2. С. 245–254.

Список работ по теме диссертации в других изданиях

4. **Козлов, Е.Н.** Особенности минерального состава зон контактово-реакционного взаимоотношения щелочных комплексов как индикатор эволюции метасоматических систем (на примере массива Озёрная Варака) // Наука и образование – 2012 [Электронный ресурс] : материалы междунар. науч.-техн. конф., Мурманск, 2012, Мурман. гос. тех. ун-т. С. 151–155.
5. **Козлов, Е.Н.**, Фомина, Е.Н. Новые данные о минералогии и геохимии пород экзоконтакта щелочно-ультраосновного комплекса Озёрная Варака (Кольский п-ов) // Современные проблемы магматизма и метаморфизма. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 150-летию академика Ф.Ю. Левинсона-Лессинга и 100-летию профессора Г.М. Саранчиной. Том 1. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. С. 263–264.

6. **Kozlov, E.,** Arzamastsev, A. Evolution of metasomatizing fluids in contact zones of carbonatite massifs (case study of the Ozernaya Varaka massif, Kola Peninsula) // Proceedings of the XXIX International conference “Ore potential of alkaline, kimberlitic and carbonatitic magmatism” (Ed.: Kogarko L.N.) – Sudak-Moscow, September 14-22, 2012, ONTI GEOKHI RAS, 2012, P. 53–55.
7. **Козлов, Е.Н.** Индикаторы эволюции метасоматической системы в зонах контактово-реакционного взаимодействия щелочно-ультраосновных массивов с карбонатитами (на примере интрузии Озёрная Варака, Кольский полуостров) // Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, 11-15 февраля 2013 г., Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ. С. 310–314.
8. **Козлов, Е.Н.** Закономерности миграции петрогенных, редких и рассеянных элементов в ходе формирования зон контактово-реакционного взаимодействия щелочно-ультраосновных комплексов с карбонатитами (на примере массива Озёрная Варака) // Наука и образование – 2013 [Электронный ресурс] : материалы междунар. науч.-техн. конф., 4-11 марта 2013 г, Мурманск, Мурман. гос. тех. ун-т. С. 355–359.
9. **Козлов, Е.Н.,** Арзамасцев, А.А. Оценка механизма и масштабов метасоматического массопереноса в пределах зон контактово-реакционного взаимодействия щелочно-ультраосновных комплексов с карбонатитами (на примере массива Озёрная Варака, Кольский полуостров) // Труды X Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвящённой 150-летию со дня рождения академика В.И. Вернадского, 7-10 апреля 2013 г., г. Апатиты, ГИ КНЦ РАН. С. 78–81.
10. **Козлов, Е.Н.** Метасоматиты контактовых ореолов массивов девонской Кольской щелочной провинции // Наука и образование - 2014 [Электронный ресурс] : материалы междунар. науч.-техн. конф., 24-28 марта 2014 г, Мурманск, Мурман. гос. тех. ун-т. С. 844–847.
11. **Козлов, Е.Н.,** Арзамасцев, А.А. Высокозарядные и редкоземельные элементы в фенидах массивов палеозойской Кольской щелочной провинции // Рудный потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма. Школа "Щелочной магматизм Земли". Труды XXXI Международной конференции, посвящённой памяти академика Ф.П. Митрофанова. 7-8 октября 2014 г., г. Москва, ГЕОХИ РАН / Отв. ред. Л.Н. Когарко. – М.: ГЕОХИ РАН, 2014. С. 53–54.