

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Степанова

Степанова Александра Владимировна

**ПЕТРОЛОГИЯ ВЫСОКОЖЕЛЕЗИСТЫХ ТОЛЕИТОВЫХ
ДАЙКОВЫХ КОМПЛЕКСОВ РАННЕГО ПРОТЕРОЗОЯ
СЕВЕРНОЙ КАРЕЛИИ**

25.00.04 - петрология, вулканология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена в Институте геологии Карельского научного центра РАН

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук профессор
Шинкарев Николай Филиппович

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
Вревский Александр Борисович

доктор геолого-минералогических наук профессор
Лазаренков Вадим Григорьевич

Ведущая организация: Геологический институт Кольского научного центра РАН

Защита состоится «___»_____2004 г. в _____ часов в ауд. _____ на заседании диссертационного совета Д 212.232.25 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук при Санкт-Петербургском государственном университете (199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д.7/9).

e-mail: geoweb@krc.karelia.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. А.М. Горького при Санкт-Петербургском государственном университете

Автореферат разослан «___»_____2004г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

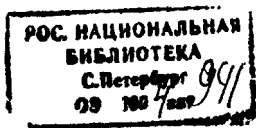
/А.Б. Кольцов/

Актуальность исследований. Докембрийские рои мафических даек, широко распространенные на континентах, являются важными источниками информации о главных периодах образования континентальных рифтов и этапах фрагментации суперконтинентов (Condie, 1997, Courtillot et al, 1999, Ernst et al, 2002). Обширные рои мафических даек, близких по составу к фанерозойским континентальным платобазальтам (Tagney, 1992), рассматриваются как реликты питающих систем крупных магматических провинций (LIPs) и являются обычными для протерозоя (Cofin and Eldholm, 1994, Ernst et al, 1995). Формирование роев мафических даек связано с существованием плюма (LeCheminant and Heaman, 1989) или рифтовой системы (Anderson, 2001), а изучение их с использованием прецизионных геохимических и изотопно-геохимических методов позволяет оценить пространственную и временную гетерогенность мантийного источника при формировании LIPs.

Изучение роев мафических даек вносит значительный вклад в понимание геологической истории региона. Так как внедрение их происходит в течение короткого временного интервала и на очень большой площади, целесообразно использование роев мафических даек как региональных временных маркеров. Мафические дайки регистрируют магнитное поле Земли, а первичная остаточная намагниченность, обычно сохраняющаяся в зонах закалки даек, позволяет проводить глобальные палеомагнитные реконструкции.

Цели и задачи исследования. Целью работы являлось решение проблемы корреляции раннепротерозойских высокожелезистых толеитовых дайковых комплексов Восточной части Балтийского щита. Для этого были поставлены следующие задачи:

- детальное изучение геологии комплексов даек Fe-толеитов, определение их возраста и места в ряду других дайковых комплексов региона;
- изучение минералогии и петрографии пород дайковых комплексов Fe-толеитового состава;
- анализ геохимических характеристик высокожелезистых толеитов;
- моделирование процессов формирования и последующей эволюции исходных магм комплексов и условий мантийной магмогенерации.



Научная новизна. Впервые на основании комплексных исследований в составе пязозерского комплекса долеритовых даек выделено три разновозрастные группы пород.

Впервые показано существование геохимических аналогов групп, выделенных среди долеритов, в составе комплекса коронитовых габбро Беломорского подвижного пояса.

Выполнены модельные построения для условий магмогенерации раннепротерозойских Fe-толеитовых дайковых комплексов.

Впервые определен изотопный возраст кварцевых Fe-толеитов в составе комплекса коронитовых габбро Беломорского пояса, который составляет 2115 ± 25 млн. лет.

Фактический материал. В основу работы положен материал, полученный автором в ходе полевых работ 1993-2003 гг. В исследовании также использованы данные В.С. Степанова, часть которых была собрана при участии автора в ходе полевых работ 1987-1988 гг., данные, любезно предоставленные Ю.Й. Сыстрой, и опубликованные данные А.С. Еина по петрохимии комплекса долеритов.

Исследования проводились в рамках работ осуществляемых в ИГ КарНЦ РАН по темам «Основные закономерности эволюции эндогенных процессов в раннем докембрии Северной Карелии» (1991-1996гг., тема 130 ГР 01.9.20.004147), «Эволюция земной коры Беломорского подвижного пояса Балтийского щита» (1997-2001гг., тема 157, ГР 02.2.00.200741), «Геология и эволюция эндогенных процессов в архее и раннем протерозое южного Беломорья» (2002-2007 гг. тема 178, ГР 01.2.00.210713) и в рамках российско - финляндско - канадского проекта «Paleoproterozoic mafic igneous activities in the Eastern Finland and Karelia, Russia - correlations to other shields (Canada, Greenland and Scotland)» (1993-1996гг.).

В процессе исследований изучено более 500 шлифов. Выполнено 35 микронзондовых определений составов минералов (электроннозондовый микроанализатор MS-46 Сатеса, ГИ КНЦ РАН, аналитик Я.А. Пахомовский). В работе использовано более 150 химических анализов. Определение содержаний петрогенных элементов проводилось в аналитической лаборатории ИГ КарНЦ РАН. Содержания редких элементов в 70 образцах (рентгено-флюоресцентный анализ), редкоземельных элементов в 18 образцах (метод ICP-MS) были определены в

аналитической лаборатории ИГ КарНЦ РАН и Институте электронной оптики, Университет Оулу, Финляндия. Изотопный возраст цирконов из дайки коронитовых габбро определен А.Н. Ларионовым на ионном зонде Сатеса 1270 (NORDSIM) в Шведском музее естественной истории, Стокгольм.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть использованы при построении петрологически обоснованной модели тектонической эволюции территории Северной Карелии в раннем протерозое, а также при изучении металлогенической специализации ятулийских магматических комплексов. Изотопное определение возраста коронитовых габбро является реперным для региональной геологии.

Установлено, что дайки высокожелезистых толеитов центральной части Пяозерского поднятия Карельского архейского кратона являются весьма перспективными для палеомагнитных реконструкций, что необходимо учитывать в ходе последующих исследований.

Основные защищаемые положения:

1. Среди раннепротерозойских даек высокожелезистых толеитов, объединенных в северной части Карельского архейского кратона в пязозерский комплекс долеритовых даек, установлено три группы пород - оливиновые Fe-толеиты, кварцевые Fe-толеиты и толеиты.
2. Коронитовые габбро Беломорского подвижного пояса коррелируются с долеритами пязозерского комплекса. Среди них установлены геохимические аналоги оливиновых Fe-толеитов, кварцевых Fe-толеитов и толеитов. Возраст кварцевых Fe-толеитов Беломорского подвижного пояса 2115 млн. лет.
3. Комплексы даек Fe-толеитов северной части Карельского архейского кратона и Беломорского подвижного пояса являются компонентом Карельской трапповой провинции, и представляют собой реликты ее питающей системы.
4. Выделенные в составе комплексов группы пород сформированы в результате нескольких эпизодов частичного плавления мантийных источников различавшихся по редкоэлементному

составу, но не связаны между собой процессами кристаллизационного фракционирования.

Объем и структура работы. Работа состоит из 6 глав, введения и заключения. Общий объем работы составляет 204 страницы, включая 73 рисунка, 16 таблиц (10 в тексте и 6 в приложении), список литературы из 115 наименований и приложения, в которых приведены химические составы пород и результаты моделирования.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований представлялись автором на молодежных конференциях, посвященных памяти К.О. Кратца (1995, 1999, 2000 гг.), международных конференциях «Беломорский подвижный пояс: геология, геодинамика, геохронология» (Петрозаводск, 1997 г.), «Проблемы генезиса магматических и метаморфических пород» (Санкт-Петербург, 1998 г.), «Рифтогенез, магматизм и металлогения Карелии. Корреляция геологических комплексов Фенноскандии» (Петрозаводск, 1999 г.), «Мантийные плюмы и металлогения» (Петрозаводск, 2002 г.), «Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза» (Санкт-Петербург, 2003 г.). По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, включающих статью и тезисы.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю проф. Н.Ф. Шинкареву. Выполнение работы было бы невозможно без поддержки и многочисленных консультаций к.г.-м.н. А.И. Слабунова, д.г.-м.н. О.И. Володичева, д.г.-м.н. Ю.Й. Сыстры, к.г.-м.н. Н.Е. Король, д.г.-м.н. С.А. Светова, к.г.-м.н. А.И. Голубева (ИГ КарНЦ РАН), кх.-м.н. В.А. Матреничева (ИГГД РАН), постоянной поддержки и помощи в работе В.С. Степанова, А.К. Карповой и сотрудников лаборатории петрологии и тектоники ИГ КарНЦ РАН. Вопросы геологии и петрологии раннепротерозойских магматических комплексов обсуждались в ходе дискуссий с к.г.-м.н. М.М. Ефимовым, к.г.-м.н. А.А. Ефимовым (ГИ КолНЦ РАН), к.г.-м.н. И.И. Бабариной (ГИН РАН), дх.-м.н. Е.В. Бибиковой (ГЕОХИ РАН), к.г.-м.н. В.В. Иваниковым, М.В. Малашиным (СПбГУ), д.г.-м.н. Е.В. Шарковым, к.г.-м.н. Т.Л. Париковой (ИГЕМ РАН). Автор выражает всем глубокую признательность и благодарность.

Автор считает своим долгом выразить благодарность Й. Вуолло за плодотворное обсуждение различных аспектов геологии и геохимии докембрийских даек и возможность проведения аналитических работ в ходе стажировки в университете Оулу, финансовая поддержка которой осуществлялась фондом СИМО.

Содержание работы

Во Введении кратко охарактеризовано состояние проблемы, определены цели и задачи исследования.

Глава I «Геологическое строение региона» включает очерк геологического строения территории Северной Карелии.

В Главе II «Раннепротерозойский основной интрузивный магматизм Северной Карелии» кратко охарактеризованы главные этапы проявления основного магматизма в раннем протерозое на территории Северной Карелии.

Глава III «Геология раннепротерозойских Fe-толеитовых дайковых комплексов Северной Карелии». В ней подробно рассмотрены морфология и строение тел комплексов, взаимоотношение их с вмещающими породами.

Глава IV «Петрография раннепротерозойских Fe-толеитовых дайковых комплексов Северной Карелии» содержит подробную петрографическую и минералогическую характеристику пород.

Глава V «Геохимическая характеристика раннепротерозойских Fe-толеитовых дайковых комплексов Северной Карелии» посвящена геохимическому описанию комплексов в целом и выделенных в их составе групп.

В Главе VI «Петрологическое моделирование процессов формирования раннепротерозойских комплексов Fe-толеитового состава» изложена методика моделирования процессов формирования комплексов Fe-толеитов и представлены полученные результаты.

В заключении обобщены результаты исследования и сформулированы главные выводы.

Введение

Раннепротерозойские дайковые комплексы Fe-толеитового состава широко распространены на территории Северной Карелии (рис. 1) и отражают один из важных этапов в геологической истории развития региона.

Изучению раннепротерозойских магматических комплексов Fe-толеитового состава на территории Восточной части Балтийского щита посвящены работы А.С. Еина (*Еин, 1983, 1984*), В.С. Степанова (*Степанов, 1981, 1984, 1994*), Й. Вуолло (*Vuollo, 1994, 1995, 1997, Vuollo et al, 1999*). В результате этих работ были выделены комплекс гранатовых габбро (*Степанов, 1981*) (коронитовых габбро в данной работе) в Беломорском поясе и пязозерский комплекс долеритовых даек (*Основные закономерности эволюции ..., 1997ф*) на территории Карельского архейского кратона (даек габбро-диабазов по А.С. Еину (*Еин, 1984*), даек Fe-толеитов по Й. Вуолло (*Vuollo, 1994*)). Основой выделения комплекса долеритовых даек являлось сходство минерального состава пород и ряд особенностей химизма (повышенные содержания TiO_2 и FeO^*). По имеющимся данным, дайки долеритов являются наиболее молодыми раннепротерозойскими интрузивными породами

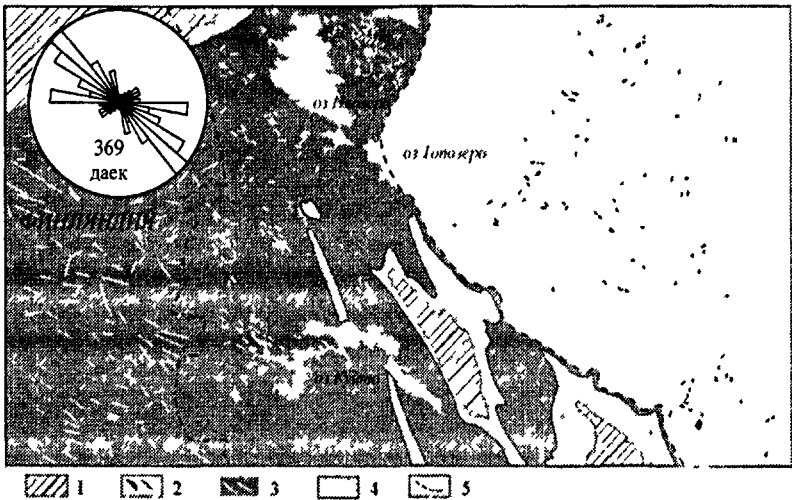


Рис. 1 Схема распространения комплексов даек Fe-толеитов на территории Северной Карелии 1- ятулийские (2.3-2.1 млрд. лет) вулканогенно-осадочные комплексы; 2 - коронитовые габбро Беломорской провинции, 3 - дайки долеритов Карельского архейского кратона; 4 - нерасчлененные сумийские и сариолийские вулканогенно-осадочные комплексы; 5 - интегральная граница Карельского архейского кратона и Беломорской провинции. Составлена с использованием данных А.С. Еина, В.С. Степанова, Ю.И. Сыстры, Й. Вуолло

Северной части Карельского архейского кратона. По данным финских геологов возраст даек Fe-толеитового состава на территории Финляндии составляет 2114 млн. лет (*Perttunen, 1987*). Ранее исследователями предпринимались попытки выделения отдельных разновозрастных групп (*Еин, 1983*), или магматических фаз (*Степанов, 1984, 1994*) среди даек долеритов Пяозерского поднятия. Отсутствие геохимических и геохронологических данных не позволило обосновать их существование, вследствие чего дайки долеритов рассматривались предыдущими исследователями как единый магматический комплекс и изучались как генетически связанная система интрузивов.

Коронитовые габбро также рассматривались предыдущими исследователями как образования единого магматического комплекса. Диагностика объектов его затруднена из-за наложенных метаморфических преобразований и требует комплексного изучения с использованием прецизионных геохимических и изотопно-геохронологических данных. Основой выделения коронитовых габбро в отдельный комплекс послужили, прежде всего, особенности минерального состава (реакционные гранатовые каймы на границе зерен плагиоклаза и клинопироксена) и химизма (повышенные содержания TiO_2 и FeO^*) пород, отличающих их от высокомагнезиальных раннепротерозойских комплексов региона, а также текущее положение по отношению к телам комплекса лерцолитов - габброноритов, определяющего возраст коронитовых габбро как более молодой, чем 2.44 млрд. лет.

Корреляции, проводившиеся между дайками долеритов, ятулийскими платобазальтами и коронитовыми габбро, были основаны главным образом на возрастном положении Fe-толеитов среди других раннепротерозойских интрузивных магматических комплексов региона и сходстве в химизме пород (*Степанов, 1984, Еин, 1984, Геология Карелии, 1987*). Эти корреляции не были подтверждены геохимическими и геохронологическими данными, что оставляло вопрос дискуссионным.

Обоснование защищаемых положений

- 1. Среди раннепротерозойских даек высокожелезистых толеитов, объединенных в северной части Карельского архейского кратона в пязерский комплекс долеритовых даек,**

установлено три группы пород - оливиновые Fe-толеиты, кварцевые Fe-толеиты и толеиты.

Долеритовые дайки Пяозерского поднятия обычно имеют простое строение и сложены мелкозернистыми породами офитовой структуры. Породы комплекса довольно однородны на всей территории Пяозерского поднятия. Установлено, что в центральной части Пяозерского поднятия дайки долеритов практически не метаморфизованы, и сохраняют первичные минералы и структуры, в то время как на территории Финляндии и восточной части Пяозерского поднятия долериты метаморфизованы в условиях зеленосланцевой, либо амфиболитовой фации метаморфизма (*Vuollo, 1994*).

На классификационных диаграммах фигуративные точки составов долеритов пязерского комплекса формируют компактные поля (рис. 2), положение которых позволяет определить долериты как породы толеитовой серии повышенной железистости, или Fe-толеиты. Метаморфизованные аналоги даек долеритов на территории Финляндии также определяются исследователями как Fe-толеиты (*Vuollo, 1994*).

Статистическое изучение ориентировок 369 даек Fe-толеитового состава (рис. 1) на территории Северной части Карельского архейского кратона выявило три главных направления простирания: СЗ 315-325° (около 70% тел), субширотное (около 20% тел) и СВ 60°±5° (менее 10% тел).

Детальное комплексное изучение долеритов на территории центральной части Пяозерского поднятия, где дайки пязерского комплекса демонстрируют наилучшую сохранность, показало, что разноориентированные дайки отличаются по минеральному составу и геохимическим характеристикам. Это послужило основой выделения в составе пязерского комплекса трех групп пород: оливиновых Fe-толеитов, кварцевых Fe-толеитов и толеитов.

Оливиновые Fe-толеиты

Петротипом этой группы являются дайки в южной части о. Лупчинга, расположенного в северной части оз. Пяозеро. Породы аналогичного состава установлены на северном и западном побережье оз. Пяозеро, других районах Пяозерского поднятия.

Оливиновые Fe-толеиты формируют дайки субширотного простирания, мощность которых не превышает 30 м, варьируя

обычно от 10 см до 2-3 м. Они сложены тонкозернистыми и мелкозернистыми оливиновыми долеритами (Ol 5-7%, CPx 45%, Pl 45%, TiMgt до 10%). Оливин в дайках этой группы установлен как в зонах закалки, так и в центральных частях тел.

Оливиновые Fe-толеиты содержат в среднем около 48% SiO₂, около 6.5% MgO. Для них также характерны максимальные среди долеритовых даек пязерского комплекса содержания FeO* (>13.5%) и TiO₂ (>2.3%) (рис. 2в). В оливиновых Fe-толеитах наблюдаются довольно низкие содержания совместимых рассеянных элементов (Cr 222 г/т, Ni 87 г/т, V 350 г/т) и максимально высокие среди долеритов концентрации несовместимых редких элементов (Zr 200 г/т, Y 42 г/т, Nb 15 г/т) (рис. 2г, д).

U/Pb возраст долеритов из дайки в южной части о. Лупчинга, определение которого было выполнено Й. Вуолло по бадделеиту составляет 2331±5/-19 млн. лет (Vuollo, 1997), Sm/Nd возраст этих же пород 2336±30 млн. лет (Mertanen et al, 1999).

Кварцевые Fe-толеиты

Кварцевые Fe-толеиты объединяют в своем составе около 70% всех известных даек долеритов. Петротипом этой группы являются дайки кварцевых долеритов о. Чулкашуари, расположенного в северной части оз. Пязеро. Дайки кварцевых Fe-толеитов имеют простираание СЗ 315-325°, мощность их достигает 150 метров, варьируя обычно от нескольких метров до нескольких десятков метров. Зоны закалки и маломощные дайки сложены мелкозернистыми кварцевыми долеритами офитовой структуры, а центральные части крупных дифференцированных тел - среднезернистыми лейкократовыми кварцевыми долеритами с гранофиром. Минеральный состав пород следующий: CPx 35-45%, Pl до 65%, Qu до 4%, TiMgt до 7%. Установлены дайки, зоны закалки которых образованы мелкозернистыми долеритами порфировидной структуры. Вкрапленники представлены клинопироксеном и плагиоклазом, а основная масса интерсертальной структуры сложена Pl, CPx и TiMgt.

Для кварцевых Fe-толеитов характерны вариации содержаний SiO₂ от 49.5% до 53.15%, MgO от 3.96% до 5.82% (рис.2в). Содержания FeO* (12.99-16.48%) и TiO₂ (1-28-1.74%) являются промежуточными между оливиновыми Fe-толеитами и толеитами (рис.2в). Для

пород зон закалки характерны следующие вариации концентраций совместимых редких элементов: Cr 130-227 г/т, Ni 39-101 г/т, V 310-350 г/т. Содержания несовместимых редких элементов являются промежуточными между оливиновыми Fe-толеитами и толеитами (рис. 2г, д) и составляют в среднем Zr 105 г/т, Y 30 г/т, Nb 5.5 г/т. Для РЗЭ в породах этой группы характерно плоское распределение в тяжелой и средней частях спектра с небольшой отрицательной Eu аномалией и слабым обогащением легкими РЗЭ ($\text{Ce/Yb}_N = 1.09$) (рис. 2е). Анализ геохимических характеристик кварцевых Fe-толеитов показал, что они весьма близки по составу к базальтам среднего ятулия (Малашин и др., 2003) (рис. 2).

U/Pb возраст цирконов из амфиболитизированных даек Fe-толеитового состава простираения СЗ 320° на территории Финляндии составляет 2114 млн. лет (Perttunen, 1987).

Толеиты

Эта группа пород объединяет немногочисленные дайки оливиновых долеритов простираения СВ 60°. Их петротипом являются оливиновые долериты о. Талвишари, формирующие дайки северо-восточного простираения мощностью около 50 м, протяженностью более 1 км. Зоны закалки сложены тонкозернистыми клинопироксен - плагиоклазовыми породами пойкило-офитовой структуры, а центральные части тел - среднезернистыми долеритами, содержащими 5% Ol, 45-60% Cpx, 30-50% Pl (Ap_{60-65}), до 5% TiMgt.

По геохимическим характеристикам толеиты существенно отличаются от пород двух других групп, прежде всего, более высоким содержанием MgO 7.4% и совместимых редких элементов: Cr 142 г/т, Ni 97 г/т, V 280 г/т. Содержания SiO_2 составляют в среднем 49.3%. Еще одной отличительной особенностью даек толеитового состава являются минимальные среди пород пязозерского комплекса содержания FeO^* (13.6 %), TiO_2 (1.11 %) и несовместимых рассеянных элементов: Zr 61 г/т, Y 20 г/т, Nb 3.8 г/т (рис. 2г). Толеиты характеризуются низкими концентрациями РЗЭ, а характер распределения РЗЭ в них резко отличен от кварцевых Fe-толеитов и ятулийских платобазальтов. В толеитах наблюдается плоское распределение в центральной и тяжелой частях спектра и

деплетированность легких РЗЭ ($\text{Ce/Yb}_N - 0.84$) (рис. 2е). В целом по геохимическим характеристикам толеиты близки к базальтам N-MORB (*McDonough, 1989*)

Таким образом, детальное изучение даек долеритов пязерского комплекса позволило установить в его составе три группы пород, отличающихся не только по геологическим, минералогическим и петрографическим характеристикам, но и времени образования.

2. Коронитовые габбро Беломорского подвижного пояса коррелируются с долеритами пязерского комплекса. Среди них установлены геохимические аналоги оливиновых Fe-толеитов, кварцевых Fe-толеитов и толеитов. Возраст кварцевых Fe-толеитов Беломорского подвижного пояса 2115 млн. лет.

На территории Беломорского подвижного пояса раннепротерозойские породы Fe-толеитового состава формируют дайки и малые интрузии неправильной формы (рис. 1). В дайках устанавливаются как типично интрузивные контакты с зоной закалки, захватом ксенолитов и формированием апофиз, так и нетипичные для даек контакты с отрывом апофиз, волнообразными границами. Широко распространены малые интрузии неправильной формы, которые, вероятно, являются реликтами будинированных дайковых тел. Описаны также довольно крупные интрузивы, сложенные коронитовыми габбро. В некоторых из них установлена магматическая дифференциация (*Степанов, Слабунов, 1989*).

Коронитовые габбро - это интенсивно метаморфизованные породы, характерной особенностью которых является наличие реакционных кайм на границе зерен клинопироксена и плагиоклаза, характеризующихся, прежде всего, наличием внешней гранатовой каймы, развивающейся со стороны плагиоклаза. Внутренняя кайма представляет собой срастание зерен кварца и роговой обманки. В коронитовых габбро установлено два типа клинопироксенов: метаморфический клинопироксен (салит) присутствует повсеместно. Первичномагматический клинопироксен, реликты которого установлены в единичных случаях, отвечает по составу магнезиальному авгиту.

Несмотря на интенсивные метаморфические изменения, коронитовые габбро сохраняют реликты офитовых структур и магматически зональные зерна плагиоклаза, что свидетельствует об интрузивном магматическом характере пород и кристаллизации их в гипабиссальных условиях.

Анализ петрогеохимических особенностей коронитовых габбро показал, что точки составов пород формируют на классификационных диаграммах компактные поля, практически совпадающие с полями составов даек Fe-толеитов Карельского архейского кратона (рис. 3). Положение фигуративных точек составов коронитовых габбро на диаграммах позволяет определить их как породы толеитовой серии повышенной железистости, или Fe-толеиты.

Сопоставление коронитовых габбро и даек Fe-толеитов Карельского архейского кратона показало значительное сходство геохимических характеристик пород этих комплексов. Среди коронитовых габбро установлены геохимические аналоги всех трех групп долеритовых даек, выделенных в составе пязерского комплекса.

Аналоги оливиновых Fe-толеитов представлены оливин-нормативными коронитовыми габбро, обогащенными несовместимыми редкими элементами. Содержания SiO_2 составляют в них в среднем 49.3%, MgO 6.93%. Концентрации совместимых редких элементов в породах составляют Cr 336 г/т, Ni 106 г/т, V 302 г/т. Для пород этой группы характерны максимальные среди коронитовых габбро содержания FeO^* (13.39%), TiO_2 ($> 2.3\%$) и несовместимых редких элементов Zr 193 г/т, Y 45 г/т, Nb 14.7 г/т. Содержания РЗЭ в коронитовых габбро этой группы характеризуются плоским распределением в тяжелой и средней частях спектра с небольшой отрицательной Eu аномалией и обогащением легкими РЗЭ ($\text{Ce}/\text{Yb}_N = 2.17$) (рис. 3е).

Аналоги кварцевых Fe-толеитов представлены кварцнормативными коронитовыми габбро. Породы этой группы характеризуются средними содержаниями SiO_2 51.13%, MgO 6.28%. Для них характерны довольно высокие средние содержания FeO^* (13.99%) и TiO_2 (1.43%). Концентрации несовместимых редких элементов

составляют в среднем Zr 107 г/т, Y 28 г/т, Nb 6.5 г/т, практически совпадая с содержаниями этих элементов в кварцевых Fe-толеитах Карельского архейского кратона (рис. 3г, д). Концентрации совместимых редких элементов составляют: Sr 215 г/т, Ni 69 г/т, V 363 г/т.

Содержания РЗЭ в кварцнормативных коронитовых габбро характеризуются плоским распределением в тяжелой и средней частях спектра с небольшой отрицательной Eu аномалией и обогащением легкими РЗЭ ($\text{Ce/Yb}_N = 1.69$) (рис. 3е). Характер распределения РЗЭ в них близок к кварцевым Fe-толеитам Пяозерского поднятия и базальтам среднего ятулия.

Для определения изотопного возраста магматической стадии формирования кварцнормативных коронитовых габбро Беломорского подвижного пояса был использован циркон, выделенный из дайки мощностью 30 м в районе оз. Боярское. Морфология цирконов и детали их внутреннего строения были рассмотрены с использованием катодной люминесценции, которая показала, что в популяции доминируют обломки удлинённых полупрозрачных и непрозрачных трещиноватых цирконов, типичных для интрузивных пород основного состава. U-Pb точечный анализ циркона проводился А.Н. Ларионовым на вторично-ионном масс-спектрометре NORDSIM. U-Pb возраст по 5 точкам (из 7 проанализированных точек были выбракованы две наименее конкордантные), составляет 2115 ± 25 млн. лет ($\text{СКВО} = 0.085$). Учитывая практически конкордантное положение точек, средневзвешенный Pb/Pb возраст по тем же 5 результатам равен 2115 ± 18 млн. лет ($\text{СКВО} = 4.6$). Таким образом, магматическая стадия формирования интрузий кварцнормативных коронитовых габбро оценивается в 2115 ± 25 млн. лет (Степанова и др. 2003).

Аналоги толеитов. Возможными аналогами толеитов пяозерского комплекса долеритов являются оливиннормативные коронитовые габбро с низкими содержаниями несовместимых редких элементов, формирующие в районе с. Гридино многочисленные дайки СВ простираения. Для них характерны максимальные среди коронитовых габбро содержания MgO (7.49 %) и совместимых элементов: Sr 174 г/т, Ni 10 г/т, V 275 г/т. Содержания

SiO_2 составляют в среднем 50.78 %. Породы этой группы характеризуются минимальными среди коронитовых габбро содержаниями FeO^* (12.60 %), TiO_2 (0.97%) и несовместимых редких элементов: Zr 47 г/т, Y 18 г/т, Nb 3.8 г/т и очень близки по содержаниям этих элементов к толеитам пязерского комплекса долеритовых даек (рис. 3г, д).

Таким образом, изучение коронитовых габбро показало, что они являются аналогами долеритов пязерского комплекса в Беломорском подвижном поясе. Среди коронитовых габбро выделены три группы пород, являющихся геохимическими аналогами даек оливиновых Fe-толеитов, кварцевых Fe-толеитов и толеитов Пязерского поднятия Карельского архейского кратона.

3. Комплексы даек Fe-толеитов северной части Карельского архейского кратона и Беломорского подвижного пояса являются компонентом Карельской трапповой провинции и представляют собой реликты ее питающей системы.

Геохимическое сопоставление даек Fe-толеитового состава Карельского архейского кратона (рис.2) и коронитовых габбро Беломорского подвижного пояса (рис. 3) с ятулийскими платобазальтами (данные по Малашин и др., 2003) Карельской трапповой провинции (Голубев и др., 2002) показало значительное сходство кварцевых Fe-толеитов, кварцнормативных коронитовых габбро и базальтов среднего ятулия. Кроме того, среди коронитовых габбро установлены кварцнормативные породы, по характеру распределения РЗЭ близкие к верхнеятулийским базальтам.

Имеющиеся изотопные определения возраста (Perttunen, 1987, Степанова и др., 2003) наряду с геологическими и геохимическими данными позволяют предполагать, что дайковые комплексы Fe-толеитового состава на территории Северной Карелии являются частью более крупной магматической системы, включающей в себя и ятулийские платобазальты, и представляют собой реликты питающей системы Карельской трапповой провинции, а не отражают самостоятельный период магматической активности.

Кроме того, имеющиеся данные дают основание утверждать, что породы с возрастом 2.11 млрд. лет фиксируют наиболее активную фазу проявления ятулийского магматизма (базальты среднего ятулия (*Малашин и др., 2003*), кварцевые Fe-толеиты Карельского архейского кратона и Беломорского подвижного пояса).

4. Выделенные в составе комплексов группы пород сформированы в результате нескольких эпизодов частичного плавления мантийных источников различавшихся по порядку элементному составу, не несвязаны между собой процессами кристаллизационного фракционирования.

Вариации содержаний главных и рассеянных элементов в породах Fe-толеитовых дайковых комплексов Северной Карелии накладывают ограничения на возможные варианты генезиса этих групп.

Кварцевые Fe-толеиты не могут быть рассмотрены как возможные исходные магмы для двух других групп, прежде всего вследствие низкого содержания Mg, Cr, Ni. Кроме того, имеющиеся изотопные определения возраста свидетельствуют о разрыве примерно в 200 млн. лет между временем образования оливинных Fe-толеитов (2331 млн. лет (*Vuollo, 1997*)) и кварцевых Fe-толеитов (2114 млн. лет (*Perttunen, 1987*)).

Оливиновые Fe-толеиты также не могут быть родоначальными магмами для кварцевых Fe-толеитов и толеитов, прежде всего, из-за высоких содержаний несовместимых рассеянных элементов.

В свою очередь, *оливиновые Fe-толеиты* не могут быть получены в результате дифференциации магм толеитового состава, так как содержания MgO в них недостаточно низкие (6.5-7%) по сравнению с толеитами (7.5%), чтобы было возможно накопление несовместимых рассеянных элементов в остаточном расплаве, сопоставимое с содержаниями их в оливиновых Fe-толеитах ($Zr \rightarrow 200$ г/т, $Y \rightarrow 42$ г/т, $Nb \rightarrow 3.8 \rightarrow 15.3$ г/т).

Толеиты, на первый взгляд, могли бы быть исходными магмами для кварцевых Fe-толеитов. Моделирование кристаллизационной дифференциации состава, отвечающего зоне закалки дайки толеитов о. Талвишари (рис. 4) с использованием программы Pele 4.0 (распространяется свободно, автор А. Будероу (*Bouderau, 1999*))

показало следующее. Несмотря на то, что при моделировании возможно совпадение редкоэлементного состава остаточного расплава и кварцевых Fe-толеитов (рис. 4в, г) при высоких ($> 40\%$) степенях кристаллизации, точки составов кварцевых Fe-толеитов на вариационных диаграммах для окислов петрогенных элементов располагаются на значительном удалении от линий изменения состава остаточного расплава (рис. 4а, б). Следовательно, магмы толеитового состава не могли быть исходными для кварцевых Fe-толеитов.

Таким образом, рассмотрение возможных генетических связей между толеитами, оливиновыми Fe-толеитами и кварцевыми Fe-толеитами раннепротерозойских дайковых комплексов Северной Карелии показало, что, эти группы пород не связаны друг с другом процессами кристаллизационного фракционирования. Это позволяет предполагать, что разнообразие составов пород в раннепротерозойских Fe-толеитовых дайковых комплексах Северной Карелии определялось другими процессами, главным образом, частичным плавлением в мантии, что позволяет рассматривать вопросы петрогенезиса каждой группы независимо от двух других.

Результаты численного моделирования частичного плавления мантийного источника, проведенного с использованием макросов В.А. Матреничева для Excel (*Матреничев, 2000*), позволяют предполагать, что формирование исходных магм *оливиновых Fe-толеитов* происходило в результате примерно 5% частичного плавления мантийного источника, близкого по составу к примитивной мантии в поле стабильности шпинели. Результаты моделирования процессов кристаллизационного фракционирования исходных расплавов оливиновых Fe-толеитов с использованием программы Pele 4.0 позволяют предполагать, что вторым этапом формирования магм оливиновых Fe-толеитов была кристаллизация Crx, P1 и O1 в соотношении $\sim 50:40:10$ в промежуточной камере в условиях низкой фугитивности кислорода, что обусловило обогащенность остаточных жидкостей FeO*. Степень кристаллизации не превышала 20%.

Формирование магм *кварцевых Fe-толеитов* также, вероятно, может быть описано в рамках двухстадийной модели.

Первый этап - 7% плавление мантийного источника в поле стабильности шпинели. На втором этапе формирования магм кварцевых Fe-толеитов происходило кристаллизационное фракционирование О1 и Орх в промежуточной камере в условиях низкой фугитивности кислорода. Степень кристаллизации при этом не превышала 25%.

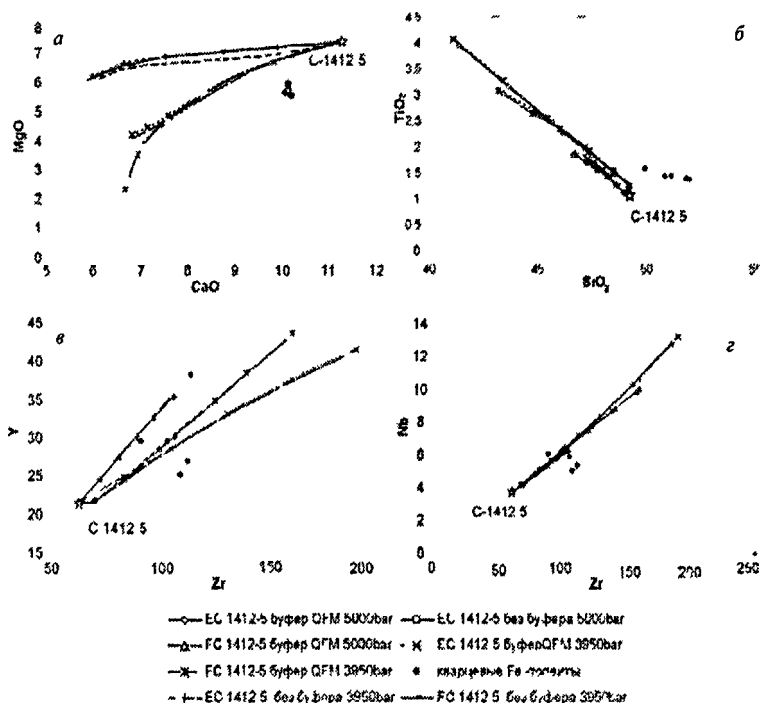


Рис. 4 Результаты моделирования процессов кристаллизационного фракционирования состава, отвечающего зоне закалки дайки толеитов на о Талвишари (обр C-1412-5) FC - фракционная кристаллизация, EC - равновесная кристаллизация

Сопоставление составов *толеитов* с результатами моделирования частичного плавления шпинелевого перидотита свидетельствует о том, что степень плавления была большей, чем для двух других групп и составляла около 12 %. При этом источник магм толеитового состава был деплетирован относительно источников

оливиновых и кварцевых Fe-толеитов. Второй этап формирования магм толеитового состава включал, вероятно, кристаллизацию ОI и ОРх.

Таким образом, результаты геохимического моделирования петрогенетических процессов свидетельствуют о том, что формирование групп в составе Fe-толеитовых дайковых комплексов раннего протерозоя Северной Карелии происходило в результате различных эпизодов плавления мантийного источника. При этом степень плавления и редкоэлементный состав мантийных перидотитов различались для разных групп, но формирование исходных магм всех групп происходило в поле стабильности шпинели.

Заключение

Изучение геологии, геохимии, минералогии и петрографии раннепротерозойских Fe-толеитовых дайковых комплексов позволило сделать следующие выводы:

1. В пределах раннепротерозойских дайковых комплексов Fe-толеитового состава на территории Северной Карелии выделено три разновозрастных группы пород, отличающихся по особенностям минерального состава и геохимическим характеристикам: оливиновые Fe-толеиты, кварцевые Fe-толеиты, толеиты. По имеющимся геохронологическим данным, оливиновые Fe-толеиты были образованы в период 2.33 млрд. лет, а кварцевые Fe-толеиты в период 2.11 млрд. лет. Время образования даек толеитового состава в настоящее время неизвестно.
2. Установленные в составе пязерского комплекса долеритовых даек группы пород, а именно, оливиновые Fe-толеиты, кварцевые Fe-толеиты и толеиты, и их геохимические аналоги среди коронитовых габбро Беломорского подвижного пояса не связаны между собой процессами кристаллизационного фракционирования. Это позволяет предполагать, что разнообразие составов пород в пределах раннепротерозойских Fe-толеитовых дайковых комплексов Северной Карелии обусловлено, прежде всего, процессами генерации магм в мантии.
3. Представляется наиболее вероятным, то комплексы даек Fe-толеитового состава были сформированы в результате

воздействие плюма, ответственного и за формирование ятулийских платобазальтов, а сами дайки представляют собой реликты питающей системы крупной магматической провинции.

4. Существование разновозрастных групп, не связанных генетически, в составе раннепротерозойских Fe-толеитовых дайковых комплексов Северной Карелии предполагает изменение границ и вещественного наполнения пязозерского комплекса долеритовых даек и комплекса коронитовых габбро, и, возможно, выделение других дайковых комплексов в северной части Карельского архейского кратона и Беломорском подвижном поясе.

Таким образом, формирование Fe-толеитовых дайковых комплексов Северной Карелии не ограничивалось периодом 2.1 млрд. лет, а имело значительно более длительную геологическую историю. Тем не менее, для построения геохронологически обоснованной и петрологически корректной модели магматической активности на территории Восточной части Балтийского щита в ятулийское время, не достаточно единичных изотопных определений возраста, а необходимо детальное геохронологическое и изотопно-геохимическое изучение докембрийских магматических комплексов, особенно в пределах Беломорского подвижного пояса.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. *Степанова А.В.* Базитовые дайки района д. Гридино, Западное Беломорье // Материалы 9-й молодежной научной конференции «Геология Балтийского щита и других докембрийских областей России, Апатиты, ГИКНЦРАН, 1995, с. 113-118.
2. *Степанов В.С., Степанова А.В.* Интрузивные мафиты в докембрии Северной Карелии, петрология и корреляция // "Корреляция геологических комплексов Фенноскандии" (тезисы докладов), СПб, 1996, с. 87
3. *Степанова А.В., Степанов В.С.* Взаимоотношения долеритовой и габброноритовой даек в районе Айгубы оз. Верхнее Куйто // Вопросы геологии, магматизма и рудогенеза Карелии", Петрозаводск, ИГ КарНЦ РАН, 1996, с. 13-16

4. *Степанов В.С., Степанова А.В.* Геологические взаимоотношения базитовых даек и гранитоидов в СВ части о. Чулкашуари, оз. Пяозеро // Геология, петрография и геохимия докембрийских образований Карелии", Петрозаводск, ИГ КарНЦ РАН, 1997, с. 19-22
5. *Степанова А.В., Степанов В.С.* Ассоциация толеитовых - Fe-толеитовых комплексов Северной Карелии // Основные закономерности эволюции магматизма в раннем докембрии Северной Карелии (заключительный отчет по теме 130 (план НИР), шифр 3.1.5.), Петрозаводск, ИГ КарНЦ РАН, 1997, с.290-311
6. *Степанова А.В.* Fe-толеитовые дайки Западного Беломорья // Беломорский подвижный пояс (геология, геодинамика, геохронология) (тезисы докладов), Петрозаводск, ИГ КарНЦ РАН, 1997, с.55
7. *Степанова А.В.* Геохимия раннепротерозойских Fe-толеитовых даек северной части Карельского кратона // Материалы международной конференции «Рифтогенез, магматизм, металлогения докембрия. Корреляция геологических комплексов Фенноскандии», Петрозаводск, ИГ КарНЦ РАН, 1999, с.157
8. *Степанов В.С., Степанова А.В.* Раннепротерозойский магматизм северной Карелии: ассоциации магматических комплексов и главные черты эволюции // Материалы международной части конференции «Рифтогенез, магматизм, металлогения докембрия. Корреляция геологических комплексов Фенноскандии», Петрозаводск, ИГ КарНЦ РАН, 1999, с.155-156
9. *Степанова А.В.* Раннепротерозойские Fe-толеитовые дайки Северной Карелии // Материалы X молодежной конференции «Геология и полезные ископаемые северо-запада и центра России», Апатиты, ГИ КНЦ РАН, 1999, с.85-87
10. *Степанова А.В.* Геология и петрология раннепротерозойских Fe-толеитовых дайковых комплексов Северной Карелии // Геология и геоэкология Фенноскандии, Северо-Запада и Центра России. Материалы XI молодежной научной конференции, посвященной памяти К.О.Кратца, Петрозаводск, 2000, с. 84-89
11. *Степанова А.В., Ларионов А.Н, Степанов В.С., Слабунов А.И., Бибикова Е.В.* Раннепротерозойский (2.1 млрд. лет) Fe-толеитовый магматизм Беломорской провинции Балтийского щита: геохимия,

- геохронология, геодинамические следствия // Мантийные плюмы и металлогения. Материалы международного симпозиума, Петрозаводск-Москва, ИГ КарНЦ РАН, 2002, с.234-237
12. *Степанова А.В., Ларионов А.Н., Бибикина Е.В., Степанов В.С., Слабунов А.М.* Раннепротерозойский (2.1 млрд. лет) Fe-толеитовый магматизм Беломорской провинции Балтийского щита: геохимия, геохронология // Доклады РАН, 2003, т.390, №4, с.528-532
 13. *Степанова А.В., Ларионов А.Н., Бибикина Е.В., Степанов В.С., Слабунов А.М.* Геология, геохимия и геохронология ятулийского комплекса коронитовых габбро Беломорского подвижного пояса Балтийского щита // материалы П Российской конференции по изотопной геохронологии «Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза» СПб, ИГГД РАН, 2003, с.487-489
 14. *Stepanov V.S., Slabunov A.I., Stepanova A.V.* Lateral variations of late Archean and early Proterozoic mafic-ultramafic magmatism and changes in crustal thickness in the Earliest Fennoscandian (Baltic Shield). // MAEGS-9 (тезисы докладов) 4-9 сентября, 1995г., СПб, 1995, с.109
 15. *Slabunov A.I., Stepanova A.V., Larionov A.M., Stepanov V.S. and Bibikova E. V.* Geology, geochronology and correlation of the Jatulian coronitic gabbro complex in the Belomorian mobile belt (BMB) // SVEKOLAPKO. An EUROPROBE project. 6th Workshop, Lammi, Abstracts. University of Oulu, report No.24.2001. P.55

Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99. Подписано в печать 09.11.04. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 1,0. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Изд. № 69. Заказ № 450

Карельский научный центр РАН
185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50
Редакционно-издательский отдел

23508