


На правах рукописи



Егорова Юлия Сергеевна

**САНУКИТОИДЫ ФЕННО-КАРЕЛЬСКОЙ ПРОВИНЦИИ
БАЛТИЙСКОГО ЩИТА: ГЕОЛОГИЯ, СОСТАВ, ИСТОЧНИКИ**

Специальность 25.00.04 – петрология, вулканология

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург
2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и геохронологии докембрия РАН, в лаборатории геологии и геодинамики

Научный руководитель:

Доктор геолого-минералогических наук,
профессор **Лобач-Жученко Светлана Борисовна**,
ФГБУН Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, главный научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Доктор геолого-минералогических наук,
Слабунов Александр Иванович,
ФГБУН Институт геологии Карельского НЦ РАН, заведующий лабораторией петрологии и тектоники.

Кандидат геолого-минералогических наук,
Корешкова Марина Юрьевна,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра петрографии, доцент.

Ведущая организация:

ФГБУН Геологический институт Кольского НЦ РАН, лаборатория региональной геологии и геофизики.

Защита состоится *19 ноября 2014* на заседании диссертационного совета Д.002.047.01. в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН по адресу: 199034, 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, Санкт-Петербург, наб. Макарова д. 2. Электронная почта: dis.sovet@ipgg.ru, Факс: 8(812)328 4801

Автореферат разослан сентября 2014 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д. 002.047.01.

Кандидат геолого-минералогических наук

Т.П. Щеглова



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Санукитоиды – специфическая группа высокомагнезиальных магматических пород, обогащенных Ba, Sr, LREE и щелочами. Термин «санукитоид» был введен для высокомагнезиальных архейских гранитоидов провинции Сьюпериор Канадского щита (Shirey, Hanson, 1984). Впоследствии архейские «санукитоиды» были установлены на большинстве древних кратонов мира.

На Балтийском щите изучение санукитоидов началось в 1999 году. Толчком к нему послужило отнесение к санукитоидам умереннощелочных пород Панозерской интрузии (Центральная Карелия) (Чекулаев, 1999). Ранее породы, соответствующие по составу санукитоидам, были описаны в Кольско-Норвежской (Levchenkov et al., 1995; Nordgulen et al., 1995; Vetrin et al., 1995) и в Карельской (Глебова-Кульбах и др., 1960, 1963; Чекулаев, 1996; Иваников, 1997) провинциях Балтийского щита, и относились к субщелочным габбро-гранитной и пироксенит-сиенитовой сериям. В дальнейшем были сформулированы основные особенности геохимического состава и времени формирования пород неархейской санукитоидной серии Карелии (Lobach-Zhuchenko et al., 2000, 2005, 2008; Самсонов и др., 2001, 2004; Bibikova et al., 2005; Бибикина и др., 2006). В последние годы появились исследования санукитоидов Финской Карелии (Halla, 2005, 2009; Kärnäho et al., 2006, 2007; Heilimo et al., 2009, 2011, 2013; Mikkola et al., 2011a) и Кольского п-ва (Кудряшов и др., 2013). В результате на Балтийском щите было выделено более 30 санукитоидных массивов (рис. 1).

Особенности геохимического состава санукитоидов свидетельствуют об их образовании из обогащенной (метасоматизированной) мантии (Shirey, Hanson, 1984; Lobach-Zhuchenko et al., 2005 и др.). В связи с этим санукитоиды являются важным объектом для изучения процессов метасоматоза мантии в архее. Из-за широких вариаций составов пород санукитоидной серии отсутствует единое представление о составе, условиях образования и плавления их источника, природе и составе агентов и времени метасоматоза мантии, роли ассимиляции корового материала и смешения расплавов из разных источников. Поэтому проблема генезиса санукитоидов является одной из актуальных в петрологии.

Изучение санукитоидов и ассоциирующих с ними лампрофиров имеет практический интерес, так как с подобными типами пород связаны проявления золоторудной минерализации (Lobach-Zhuchenko et al., 2000; Кулешевич, 2002; Ларионова и др., 2007; Кулешевич, Лавров, 2007) и алмазов (Lefebvre et al., 2005).

Объекты исследования - санукитоидные интрузии Балтийского щита. Основное внимание в работе уделено санукитоидам восточной части Фенно-Карельской провинции.

Цели и задачи исследования. Установить закономерности в строении и составе санукитоидных интрузий, выделить основные типы санукитоидов. Выяснить причины, обусловившие различия между разными типами санукитоидов. Определить состав, условия образования и плавления метасоматизированного мантийного источника санукитоидов.

Были поставлены и решены следующие задачи: (1) сбор информации о строении и составе санукитоидов Балтийского щита и других геологических районов; (2) изучение геологического строения, соотношения магматических фаз массивов, петрографического и геохимического состава пород; (3) анализ Sm-Nd, Rb-Sr, U-Pb, Lu-Hf изотопных систем пород и минералов разных типов санукитоидов; (4) определение и анализ изотопного состава углерода и кислорода карбонатов санукитоидов для оценки природы флюида, участвовавшего в формировании массивов; (5) анализ литературных данных о составе ксенолитов метасоматизированной мантии и физико-химических условиях плавления мантийных пород в присутствии флюида; (6) установление состава и расчет объемной доли корового контаминанта, определение условий и механизмов контаминации мантийных санукитоидных расплавов.

Фактический материал и методы исследования. Для проведения настоящего исследования были использованы литературные и полученные в ходе предшествующих исследований данные, а также материалы автора, по 34 интрузиям санукитоидов Балтийского щита: более 500 результатов химических анализов пород и 300 - минералов, в том числе более 200 не опубликованных ранее; 50 Rb-Sr, 36 Pb-Pb и более 200 результатов Sm-Nd изотопных анализов пород и минералов, а также 22 результата измерения изотопного состава углерода и кислорода карбонатов.

Определения содержания главных, редких и редкоземельных элементов в породах выполнено рентгеноспектральным и ICP-MS методами во ВСЕГЕИ. Изучение химического состава минералов проведено на электронных микроскопах JEOL JSM-6510LA с ЭДС приставкой JED 2200 в ИГГД РАН и VEGA II LSH, Tescan с ЭДС приставкой INCA Energy 350 в КарНЦ РАН. Изотопный состав U, Pb, а также Sm, Nd, Rb и Sr измерен в ИГГД РАН на масс-спектрометрах Finnigan MAT_261 и Triton T1, соответственно. Изотопный состав углерода и кислорода определен на двухканальном масс-спектрометре MS-20 AEI в ЦИИ ВСЕГЕИ.

Личный вклад автора. В работе использованы геологические материалы, собранные автором в ходе полевых работ на Панозерской (2004, 2005 г.г.), Эльмусской (2005, 2006 г.г.), Шаравалампинской (2007, 2014 г.), Сяргозерской (2014 г.) и Бергаулской (2014 г.) интрузиях, а также данные, полученные при работе с коллекциями образцов пород Хижъярвинской, Бергаулской, Хаутаваарской и Кургенлампинской интрузий, предоставленных в распоряжение автора. Автором было просмотрено и описано более 200 шлифов, выполнено более 100 определений химического состава минералов. По коллекциям автора сделано 15 определений изотопного состава углерода и кислорода карбонатов. Автором была проведена подготовка 20 проб пород в целом для Sm-Nd и 8 фракций апатита для Sm-Nd и Rb-Sr анализов, 9 - фракций калиевого полевого шпата для U-Pb изотопных анализов, включающая химическое разложение и последующее выделение элементов методом ионообменной хроматографии, в химической лаборатории ИГГД РАН.

Автором был проведен сбор и анализ большого объема данных для различных типов массивов санукитоидов, выполнена корреляция между геологическими, геохимическими и изотопными характеристиками, рассмотрено влияние различных

факторов на состав санукитоидов, проведены моделирование условий формирования санукитоидных расплавов и процессов коровой контаминации.

Научная новизна и практическая значимость. Впервые осуществлен комплексный анализ геологического строения, петрографического, геохимического и изотопно-геохимического составов пород и минералов почти всех известных к настоящему времени интрузий санукитоидов Балтийского щита. В результате установлены закономерные различия в геологическом положении, строении и составе интрузий, а также причины, обусловившие эти различия, главная из которых – коровая контаминация мантийных санукитоидных расплавов.

Определен минеральный состав и изотопно-геохимические характеристики архейской метасоматизированной мантии под Балтийским щитом, установлены физико-химические параметры ее частичного плавления, приведшего к формированию начальных санукитоидных расплавов. Рассмотрена роль коровой контаминации в генезисе санукитоидных интрузий: определены состав и объемная доля контаминанта, а также механизмы контаминации.

Доказано существование фанерозойских аналогов неархейских санукитоидов Балтийского щита.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при геодинамических реконструкциях неархейской истории формирования литосферы, моделировании глубин и условий формирования обогащенных мантийных расплавов. Полученные результаты для Балтийского щита важны для анализа особенностей состава и условий формирования архейских санукитоидов и их фанерозойских аналогов других геологических районов.

Основные защищаемые положения:

1. *Неоархейские санукитоидные массивы Балтийского щита различаются по строению и составу пород: на востоке Фенно-Карельской провинции преобладают многофазные умереннощелочные интрузии; одно- двухфазные известково-щелочные интрузии преобладают на западе Фенно-Карельской провинции и в Кольско-Норвежской провинции.*

2. *Большинство умереннощелочных санукитоидов восточной части Фенно-Карельской провинции сохраняют мантийные изотопные характеристики: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)} = 0.7017 \pm 0.0005$, $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}_{(i)} (\mu) 9.0 \pm 0.2$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) +1.7 \pm 0.4$. Санукитоиды западной части Фенно-Карельской провинции и Кольско-Норвежской провинции, а также некоторые поздние фазы массивов на востоке Фенно-Карельской провинции имеют мантийно-коровые изотопные характеристики, что обусловлено контаминацией мантийных расплавов веществом коры ТТГ состава.*

3. *Формирование мантийных санукитоидных расплавов происходило в условиях дегидратационного плавления метасоматизированного гранатового лерцолита при P около 24 кбар и T около 1150 °С.*

Апробация работы. Результаты исследований были представлены в устной форме и форме тезисов на молодежных конференциях, посвященных памяти К.О. Кратца (СПб, 2007, Апатиты, 2008, 2013, Петрозаводск, 2012), на 16-й научной конференции Института геологии Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, 2007), на Всероссийской конференции, посвященной 150-летию академика Ф.Ю. Левинсона-Лессинга и 100-летию профессора Г.М. Саранчиной (СПб, 2012), на III международной научно-практической конференции памяти А.П. Карпинского (СПб, ВСЕГЕИ, 2013), на Всероссийской (с международным участием) конференции «Геология и геохронология породообразующих и рудных процессов в кристаллических щитах» (Апатиты, 2013) и в стендовой форме на 4ой международной студенческой геологической конференции в Чехии (Брно, 2013).

По теме исследований опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах и сборниках, из них 2 статьи в журналах из списка ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, одиннадцати глав, заключения и библиографического списка использованной литературы, содержащего 246 наименований. Общий объем текста диссертации составляет 209 страниц, в том числе 59 рисунков, 23 таблицы и 7 таблиц в приложении.

Благодарности. Автор глубоко признателен и высоко ценит огромную помощь и поддержку научного руководителя диссертации С.Б. Лобач-Жученко.

Автор благодарит Н.А. Арестову и В.П. Чекулаева за предоставленные материалы (карты, каменный материал и результаты химических анализов) по санукитоидам Карелии, а также всестороннюю помощь и поддержку, оказанную на всех этапах выполнения работы.

Автор благодарит А.В. Коваленко, А.Ф. Лобикова и В.М. Саватенкова за руководство в овладении методом подготовки проб для изотопных Sm-Nd, Rb-Sr и Pb-Pb исследований; К.И. Лохова за измерение изотопного состава O и C карбонатов и Е.С. Богомолова за измерение изотопного состава Sm и Nd.

Автор выражает благодарность сотрудникам минералогической группы ИГГД РАН Л.А. Ивановой, Г.В. Платоновой и А.М. Федосеенко за подготовку проб и выделение мономинеральных фракций для дальнейших анализов.

Искреннюю благодарность автор выражает сотрудникам ИГГД РАН В.М. Саватенкову, В.А. Матреничеву, Н.С. Гусевой и аспирантке КарНЦ А.В. Дмитриевой за консультации и обсуждение результатов, а также директору института А.Б. Вревскому и ученому секретарю С.Г. Скублову за помощь и поддержку диссертационного исследования.

Отдельную благодарность автор выражает С.Д. Великославинскому и А.А. Арзамасцеву за ценные замечания, которые помогли улучшить первоначальный вариант рукописи.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Геологическая позиция, строение и возраст санукитоидных массивов Балтийского щита. На Балтийском щите становление санукитоидных интрузий произошло в неогархее после формирования, деформации и метаморфизма основного объема архейской коры: ТТГ - гранитоидов и супракрустальных пород зеленокаменных поясов (ЗКП), и предшествовало внедрению интрузий плагиомикроклиновых гранитов. Большинство интрузий санукитоидов сформировалось в узком интервале времени 2.71-2.74 млрд лет назад. Более древние интрузии с возрастом 2.73 – 2.75 млрд лет (Панозеро, Эльмус, Куйттила, Поросозеро и др.) расположены на юге и востоке щита, более молодые, имеющие возраст 2.68 – 2.73 млрд лет (Кургенлампи, Нюк, Лосо и др) – на западе. Размер санукитоидных интрузий, как правило, не превышает первых км в поперечнике, но встречаются и крупные массивы - до десятков и даже сотен км (Койтере, Колмозеро). Размещение интрузий контролируется тектонически-ослабленными зонами – крупными разломами, сдвигами, приуроченными как к границам доменов, так и к структурам, секущим их границы (рис. 1).

Массивы имеют многофазное (3 и более фаз), двухфазное и однофазное строение. В строении многих интрузий участвуют разные по составу дайки, в том числе лампрофиры. Внедрение поздних магматических фаз в консолидированные, иногда деформированные породы предыдущих фаз свидетельствует о длительной истории формирования многофазных комплексов. Большая часть многофазных и двухфазных интрузий располагаются в восточной части Фенно-Карельской провинции (массивы: Панозеро, Сяргозеро, Шаравалампи и др.), а однофазных - на западе Фенно-Карельской провинции и в Кольско-Норвежской провинции (массивы Каапинсалми, Койтере, Холмватн, Колмозеро и др.) (рис. 1).

Все санукитоиды испытали метаморфизм, в большинстве случаев, не превышавший условий эпидот-амфиболитовой фации, реже в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций (массивы: Тулос, Нильсия, Каартоъярвет, Тулома, Холмватн, Косинфель).

Геохимическая характеристика санукитоидов. Санукитоидная серия – это геохимическая серия, объединяющая магматические горные породы с общими особенностями химического состава, такими как: высокие значения индекса $mg\#$ (50-75), высокие концентрации Cr (200 - 500 ppm) и Ni (80 - 300 ppm), и одновременно повышенное содержание LREE ($La > 50$ ppm, до 300 ppm), $Ba > 1000$, $Sr > 800$ ppm, щелочей и P_2O_5 (0.6 – 2%) в примитивных членах серии с содержанием SiO_2 45-53 %. Процессы эволюции первичных расплавов, такие как фракционная кристаллизация, контаминация вмещающими породами и смешение с инородными расплавами, могут приводить к отклонениям от заданных характеристик, и, как правило, сопровождаются ростом содержания SiO_2 и снижением концентраций как совместимых, так и несовместимых элементов. Для всех санукитоидов характерно наличие отрицательных аномалий Ta, Nb и Ti в спектре распределения редких элементов.

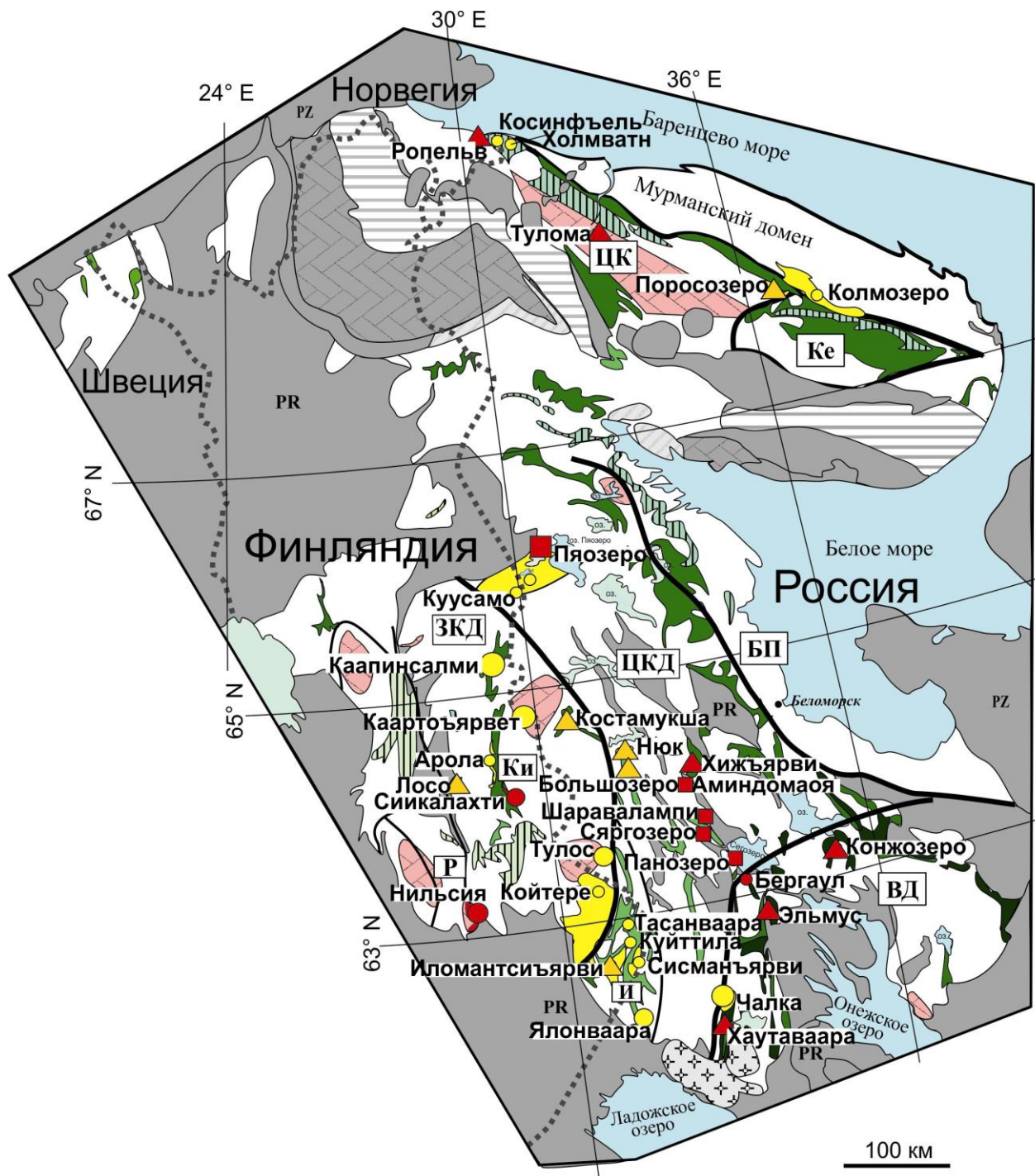



Рис. 1. Позиция санукитоидных интрузий на геологической карте Балтийского щита.

За основу взята карта из работы (Слабунов и др., 2011), границы и названия структурных подразделений на территории Финляндии даны по (Hölttä et al., 2012), Кольского п-ва - по (Nordgulen et al., 1995 и Слабунов и др., 2011), российской части Карелии - по (Лобач-Жученко и др., 2000). Локализация санукитоидных интрузий дана по (Nordgulen et al., 1995; Lobach-Zhuchenko et al., 2005; Käpyaho, 2006; Heilimo et al., 2011; Слабунов и др., 2011; Hölttä et al., 2012; Кудряшов и др., 2013).


БП – Беломорская провинция, домены: ЗКД – Западнокарельский, ЦКД – Центральнокарельский, ВД – Водлозерский, ЦК – Центральнокольский; террейны: – И - Иломантси, Ки - Кянта, Р - Раутаваара, Ке – Кейвский.

Условные обозначения:

архейские гранитоиды (ТТГ):


 нерасчлененные, с возрастом 2.9 - 2.65 млрд. лет


деформации и метаморфизм:


 а - тектонический коллаж неоархейских и палеопротерозойских пород,
б – Танэвл и Колвицкий меланжи

 неоархейские гранулитовые комплексы


метаморфизованные вулканогенные и осадочные породы ЗКП:

 3.1 – 2.92 млрд. лет

 2.88 – 2.78 млрд. лет

 2.78 – 2.75 млрд. лет

парагнейсовые пояса:

 2.9 – 2.82 млрд. лет

 2.78 -2.7 млрд. лет

интрузии санукитоидов:



 умереннощелочная серия

 известково-щелочная серия

Строение массивов санукитоидов:


  многофазное

  двухфазное


  однофазное

протерозойские гранитоиды:

 протерозойские и фанерозойские породы, в том числе:

 гранулитовые пояса, 2.0 – 1.9 млрд. лет

 граниты рапакиви, 1.65 – 1.54 млрд. лет

 границы доменов

 границы террейнов

 государственные границы

На диаграмме $K_2O+Na_2O - SiO_2$, составы санукитоидов Балтийского щита занимают поля умереннощелочных и известково-щелочных пород (рис. 2а).

Известково-щелочные санукитоиды (массивы Кургенлампи, Поросозеро, Арола и др.) характеризуются более низкими концентрациями LREE и LILE и имеют промежуточный состав между умереннощелочными санукитоидами и архейскими ТТГ Балтийского щита (рис. 2б–г).

Среди санукитоидов известково-щелочного состава (массивы Чалка, Нюк, Куйттила, Колмозеро и др.) преобладают диориты, гранодиориты, трондьемиты, ими сложена большая часть однофазных интрузий, некоторые из которых достигают размеров в десятки и сотни км². Известково-щелочные санукитоиды преобладают в Западной Карелии (включая территорию Финляндии) и на Кольском п-ве (рис. 1).

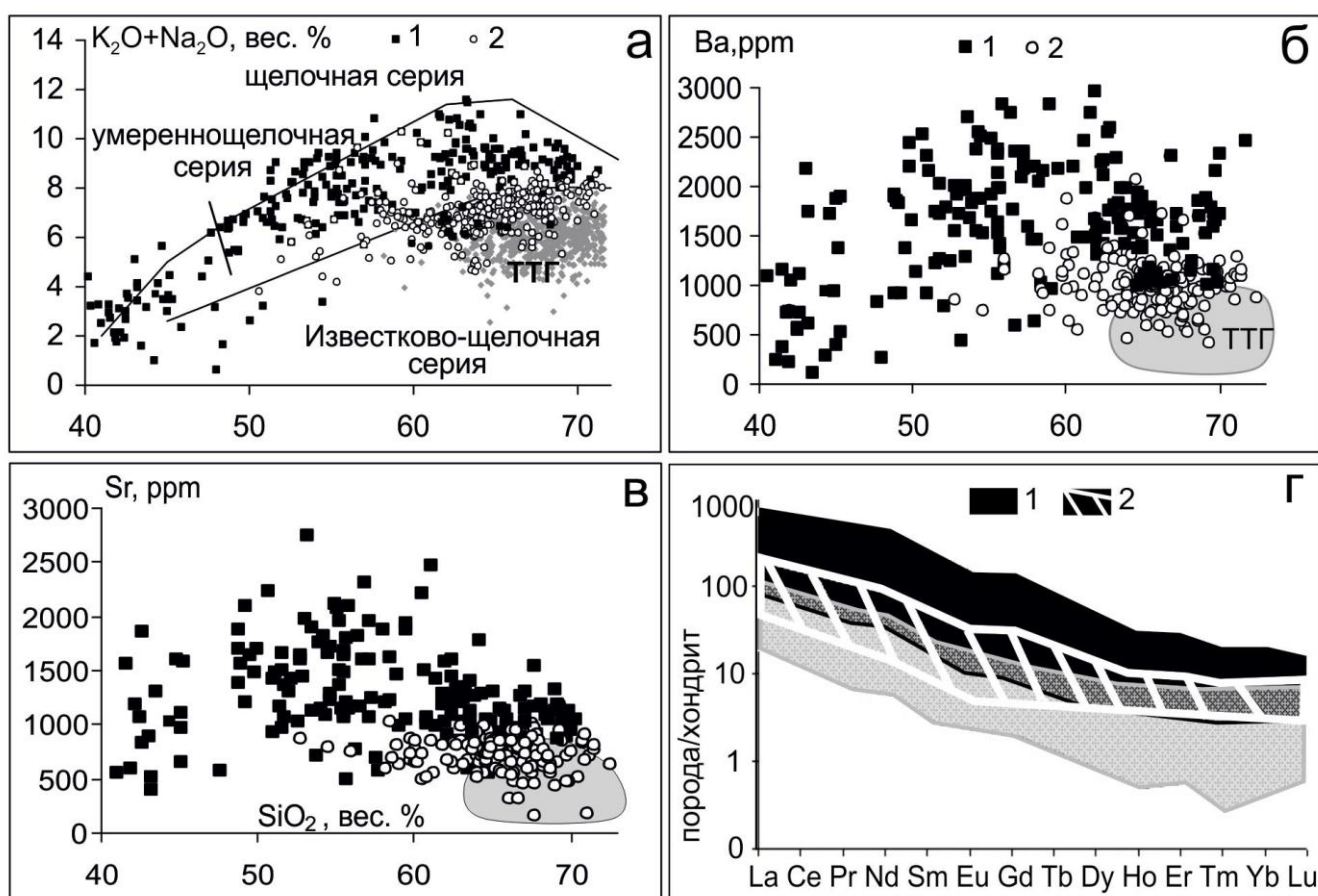


Рис. 2 а. Региональные геохимические различия санукитоидов БЩ: 1 - санукитоиды Восточной Карелии, 2 - санукитоиды Западной Карелии и Кольского п-ва. Границы полей даны по (Богатиков, 2008).

Рис. 2 б-г. Геохимические различия санукитоидов умереннощелочной (1) и известково-щелочной серии (2).

Состав архейских ТТГ пород БЩ (серые области) показан для сравнения (Чекулаев, 1996). Химические анализы (более 500) взяты из работ: (Nordgulen et al., 1995; Слюсарев и др., 2002; Самсонов и др., 2004; Halla, 2005; Lobach-Zhuchenko et al., 2005; Каруахо et al., 2006; Ларионова и др., 2007; Егорова, 2010; Neilimo et al., 2010, 2011; Дмитриева, 2011; Кудряшов и др., 2013), также использованы неопубликованные данные В.П. Чекулаева, Н.А. Арестовой, С.Б. Лобач-Жученко и автора. Содержание REE в породе нормировано на хондрит по (Taylor, McLennan, 1985).

Умереннощелочные санукитоиды (массивы Панозеро, Эльмус и др.) представлены широким спектром пород от Вт-Нв-пироксенитов до монцогранитов, они участвуют в строении многофазных и двухфазных интрузий, имеющих в поперечнике < 10 км, и преобладают на востоке Фенно-Карельской провинции (рис. 2а), зона Эльмус - Пяозеро (рис. 1).

В строении некоторых санукитоидных массивов присутствуют породы обеих серий. Умереннощелочные мафитовые включения (реликты ранних фаз или кумулюсные образования) встречаются в известково-щелочных интрузиях, например, Арола и Иломантсиярви, а в некоторых многофазных умереннощелочных комплексах присутствуют магматические фазы известково-щелочного состава, например, Шаравалампи и Пяозеро.

На основании выше изложенного можно сформулировать **первое защищаемое положение:**

Неоархейские санукитоидные массивы Балтийского щита различаются по строению и составу пород: на востоке Фенно-Карельской провинции преобладают многофазные умереннощелочные интрузии; одно- двухфазные известково-щелочные интрузии преобладают на западе Фенно-Карельской провинции и в Кольско-Норвежской провинции.

Изотопно-геохимическая характеристика санукитоидов Балтийского щита.

Sm-Nd изотопная система. Санукитоиды Балтийского щита характеризуются вариациями значений $\epsilon_{Nd}(t)$ от +2.2 до -4.6 (рис. 3). Умереннощелочные санукитоиды массивов Хижъярви, Панозеро, Эльмус, Сяргозеро, Шаравалампи, Пяозеро и первой фазы Бергаулского массива, за исключением единичных образцов, имеют однородный изотопный состав. На диаграмме в координатах $^{147}Sm/^{144}Nd - ^{143}Nd/^{144}Nd$ их составы выстраиваются вдоль эрохроны с возрастом 2.74 ± 0.07 млрд лет и значением $\epsilon_{Nd}(t) +1.7$. Значение $\epsilon_{Nd}(2.74 \text{ млрд лет}) +1.7$ соответствует изотопному составу Nd начальной мантии под БЩ в модели (Матреничев, Вревский, 2004) и расположено чуть ниже линий деплетированной мантии (ДМ) по (DePaolo, 1981) и верхней мантии по (Nägler, Kramers, 1998) (рис. 3б).

Санукитоиды Хаутаваарского и Чалкинского массивов и часть образцов Бергаулского и Панозерского массивов отличаются от большинства санукитоидов Восточной Карелии менее радиогенным составом неодима; на рис 3б некоторые из их фигуративных точек попадают в область коровых значений.

Санукитоиды Западной Карелии и Кольского п-ва имеют менее радиогенный, и, как правило, менее однородный, изотопный Sm-Nd состав, по сравнению с восточнокарельскими санукитоидами (рис. 3).

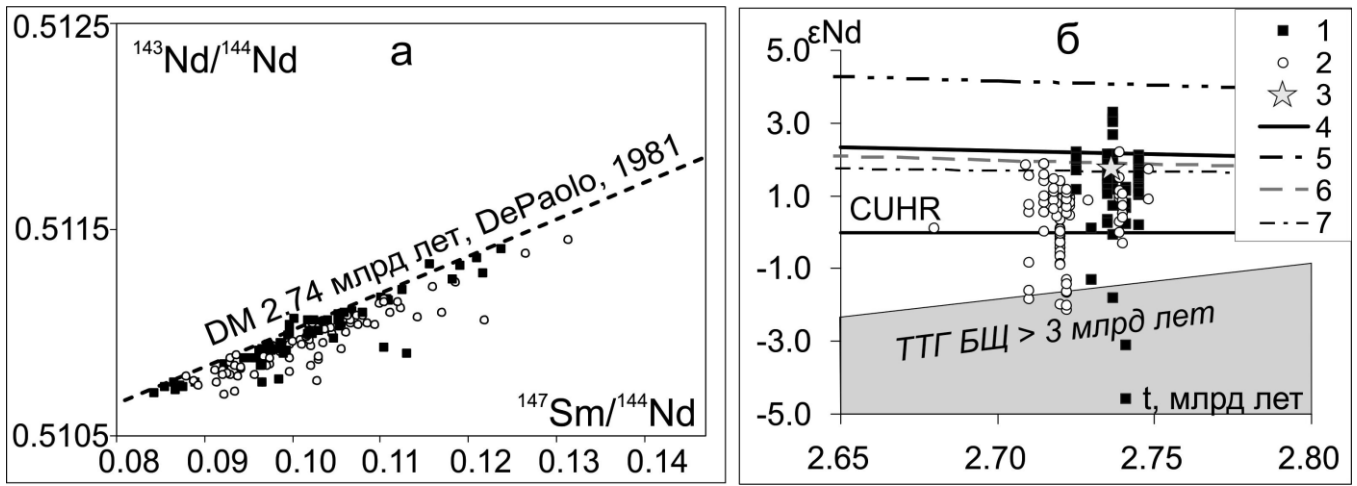


Рис 3. Диаграммы (а и б), характеризующие Sm-Nd изотопный состав санукитоидов Балтийского щита: 1 - санукитоиды Восточной Карелии, 2 - санукитоиды Западной Карелии и Кольского п-ва; 3 - значение $\epsilon_{Nd}(2.74) = +1.7$; 4-7 - Различные модели эволюции изотопного состава Nd в мантии: 4 – (DePaolo, 1981), 5 – (Goldstein et al., 1984), 6 - (Nagler, Kramers, 1998), 7 – начальная мантия под БЩ (Матреничев, Вревский, 2004). Использованы результаты Sm-Nd изотопных анализов (более 100) из работ (Kovalenko et al., 2005; Ларионова и др., 2007; Лобач-Жученко и др., 2010; Егорова, 2010; Heilimo et al., 2013; Егорова, Лобиков, 2013; Кудряшов и др., 2013), а также неопубликованные ранее данные А.В. Коваленко и автора.

Изотопный состав Pb санукитоидов изучался в мономинеральных фракциях KFsр и породе в целом на примере 9 интрузий санукитоидов БЩ. Фигуративные точки большинства санукитоидов на рис 4а смещены вдоль вторичных изохрон с возрастом 2.7 – 1.9 млрд лет, что свидетельствует о перестройке U-Pb изотопной системы KFsр во время свекофеннского метаморфизма в условиях закрытой системы. Для всех образцов рассчитан модельный возраст и значения $^{238}U/^{204}Pb_{(i)}$ (μ) по двухстадийной модели (Stacey, Kramers, 1975). Для образцов, фигуративные точки которых смещены вдоль вторичных изохрон (t_2-t_1), значения μ рассчитаны на возраст породы (t_2) по пересечению вторичных изохрон с модельными кривыми эволюции состава свинца (рис. 4а).

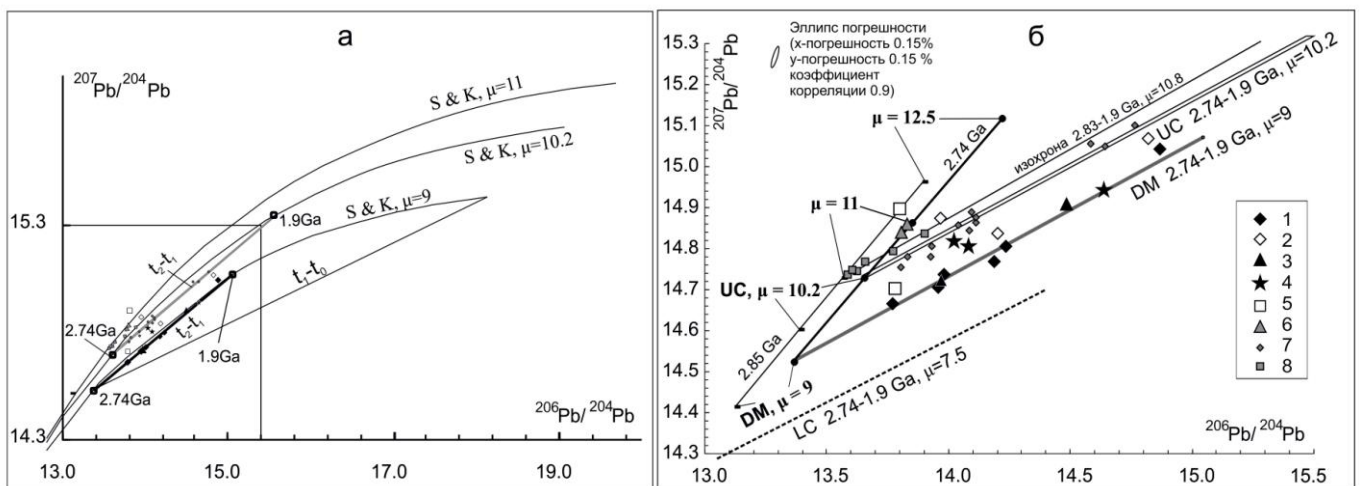


Рис. 4. Изотопный состав Pb KFsр санукитоидов Восточной Карелии, массивы: Панозеро (1 - ранние фазы, 2 – поздние фазы), 3 - Хижъярви, 4 – Эльмус, 5 - Бергаул (монцограниты) и Западной Карелии, массивы: 6 – Кургенлампи (гранодиориты 2й фазы), 7 – Нильсия, 8 - Койтере. Используются данные, опубликованные в (Halla, 2005; Лобач-Жученко и др., 2010; Егорова, Лобиков, 2013). (а) Диаграмма $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Построены линии эволюции свинца по двухстадийной модели (Stacey, Kramers, 1975) для источников с $\mu = 9, 10.2$ и 11 . (б) Та же диаграмма в более мелком масштабе. На диаграмму нанесены составы деплетированной мантии (DM) и верхней коры (UC) по модели (Zartman, Doe, 1981) на 2.74 и 2.85 млрд лет. По двухстадийной модели (Stacey, Kramers, 1975) для них рассчитаны отношения $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ (μ) и построены линии регрессии 2.74 - 1.9 млрд лет. Показаны линии смешения изотопного состава свинца источников с $\mu = 9, 10.2, 11, 12.5$, рассчитанные на время 2.74 и 2.85 млрд лет назад.

Большая часть образцов санукитоидов Восточной Карелии сохраняют мантийные значения $\mu = 8.8 - 9.2$, их фигуративные точки лежат около линии DM (рис 4б). Составы монцогранитов Бергаулского и поздних фаз Панозерского массивов, а также часть образцов кварцевых монцодиоритов Эльмусского массива характеризуются повышенными значениями μ , некоторые из них попадают в область коровых значений с $\mu > 10$ (рис. 4б).

Большинство образцов KFsр санукитоидов Западной Карелии имеют высокие значения $\mu > 10$. Составы KFsр санукитоидов массива Койтере (2.72 млрд лет, Heilimo et. al., 2011) имеют модельный возраст 2.83 млрд лет и $\mu=10.7$ (рис. 4б). Это свидетельствует о существенном вкладе свинца из верхнекорового источника с возрастом ≥ 2.83 млрд лет в состав этих пород. Присутствие «верхнекорового» свинца отмечено и для других санукитоидных интрузий Финляндии при анализе состава породы в целом: массив Куусамо - $\mu = 9.1 - 10.2$, массив Каапинсалми - $\mu \geq 11$ (Heilimo et. al., 2013).

Rb-Sr изотопная система санукитоидов изучалась на примере 7 массивов по данным для породы в целом и мономинеральных фракций.

На диаграмме в координатах $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ фигуративные точки санукитоидов БЩ формируют две линейные возрастные зависимости: архейскую и палеопротерозойскую. Так санукитоиды Панозерского массива с начальным отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2.74)} = 0.7017 \pm 0.0005$, выстраиваются вдоль линейной возрастной зависимости, углу наклона которой соответствует возраст около 2.75 млрд лет – совпадающий, в пределах погрешности, с возрастом массива (рис. 5). Аналогичный изотопный состав Sr имеет апатит габбродиорита Шаравалампинской интрузии. Сходный состав Sr также был получен для санукитоидов Поросозерского массива (Кудряшов и др., 2013) и массива Таловейс (Ларионова и др., 2007) (рис. 5).

Остальные изученные образцы (массивы Панозеро, Эльмус, Шаравалампи), а также санукитоиды Пяозерского комплекса (Ларионова и др., 2007) выстраиваются около палеопротерозойской эрохроны.

Полученное значение $\text{Sr}_{(i)} = 0.7017 \pm 0.0005$, для санукитоидов, сохраняющих архейский Rb-Sr изотопный возраст, на рис. 6 попадает в область, соответствующую эволюции изотопного состава Sr недеплетированной мантии, согласно (Jahn, Sun, 1979).

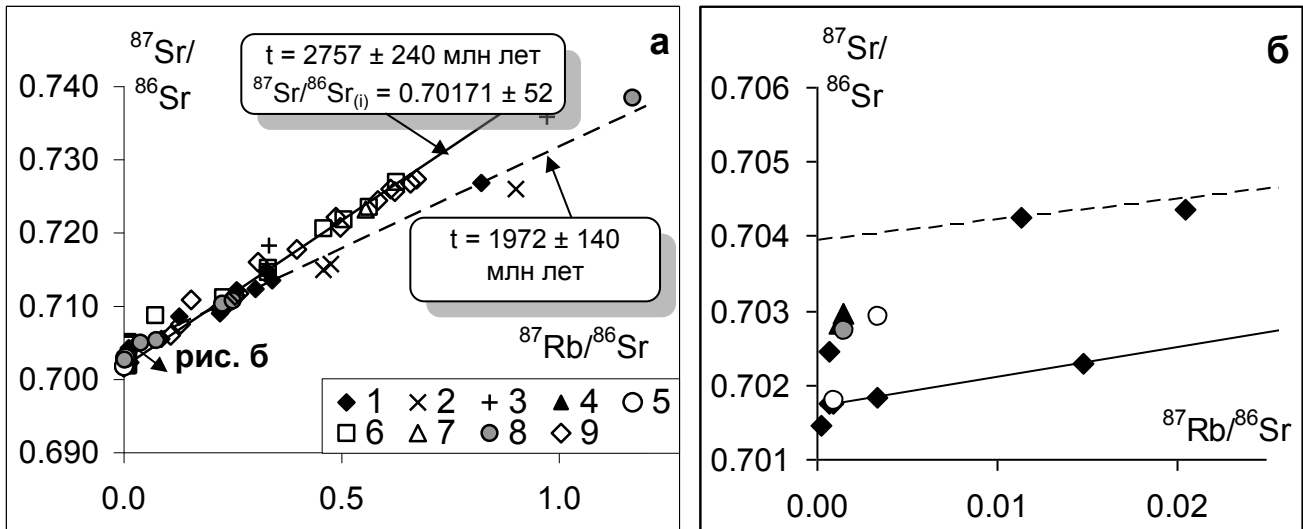


Рис 5. Rb-Sr изотопный состав санукитоидов Балтийского щита.

а – крупный масштаб, показаны составы пород и минералов, б – мелкий масштаб, показаны составы апатитов и пироксенов.

1 – породы и минералы Панозерского массива (Лобач-Жученко и др., 2010); 2 – 3 – сланцы, вмещающие Панозерский массив: 2 – отобранные за пределом массива, 3 – ксенолиты в породах массива; 4 – апатиты кварцевых монцодиоритов Эльмусского массива; 5 – апатиты пород Шаравалампинского массива; 6 – породы Поросозерского массива (Кудряшов и др., 2013); 7 – гранодиорит Колмозерского массива (Кудряшов и др., 2013); 8 – минералы и порода в целом сиенита Пяозерского массива (Ларионова и др., 2007); 9 – породы массива Таловейс (Ларионова и др., 2007).

Построены неоархейская и палеопротерозойская возрастные зависимости для Панозерского массива.

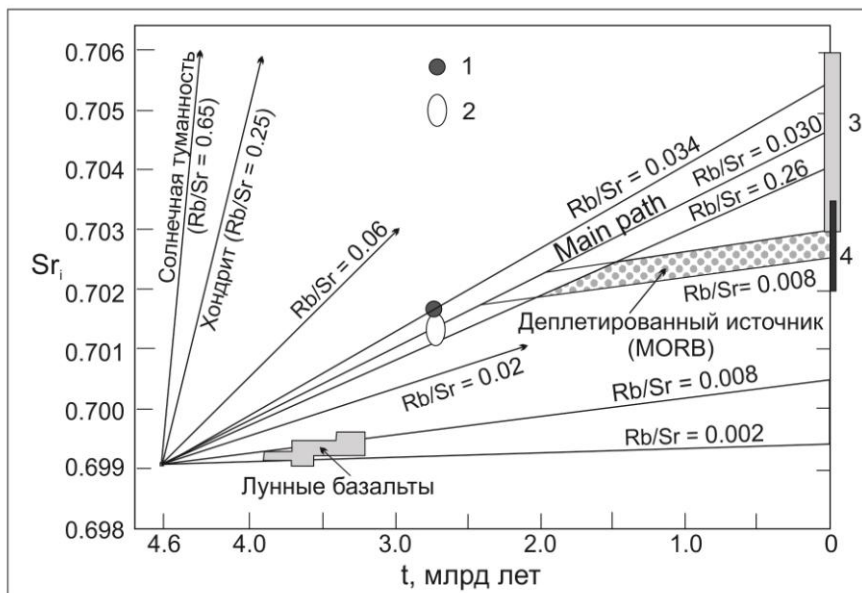


Рис. 6. Диаграмма « $Sr_i - t$ »: санукитоиды БЩ (1), неоархейские мантийные породы провинции Сьюпериор (2), современные базальты океанических островов, островных дуг и щелочные базальты (3), современные базальты MORB (4). Данные 2-4 по (Jahn, Sun, 1979) показаны для сравнения. Приведены линии эволюции изотопного состава Sr различных источников по (Jahn, Sun, 1979). Область «Main Path» соответствует эволюции большинства пород Земли, производных недеплетированной мантии по (Jahn, Sun, 1979).

Таким образом, многие умереннощелочные санукитоиды восточной части Фенно-Карельской провинции сохраняют мантийный изотопный состав Nd, Sr и Pb. Для них также получены мантийные значения $\delta^{13}\text{C} = -6 \pm 0.5 \text{ PDB}, \text{‰}$ (Лохов и др., 2008).

Санукитоиды западной части Фенно-Карельской провинции и Кольско-Норвежской провинции, а также некоторые поздние фазы массивов на востоке Фенно-Карельской провинции характеризуются вариациями значений $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (Heilimo et al., 2013) и μ от мантийных до коровых; для многих из них установлено присутствие древних ядер в цирконах и захваченных зерен (Heilimo et al., 2011; Käruaho et al., 2006; Vibikova et al., 2005; Арестова и др., 2012).

Сопоставление различных характеристик показало, что санукитоиды, содержащие ксеногенные цирконы, характеризуются более низкими значениями $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ и высокими значениями $\mu(t)$, более высоким содержанием SiO_2 , более низкими индексом магнезиальности, содержанием щелочей (особенно калия), Ba, Sr, LREE, по сравнению с санукитоидами, не содержащими ксеногенные цирконы.

Высокие значения μ свидетельствуют о том, что контаминантом были породы, богатые ураном, что свойственно средней и верхней континентальной коре. Изотопный состав Nd и геохимический состав санукитоидов, содержащих ксеногенные цирконы, является промежуточным между составами умереннощелочных санукитоидов, не содержащих ксеногенные цирконы, и архейских ТТГ БЩ, то есть может быть результатом смешения последних в некоторых пропорциях.

Таким образом, наиболее вероятным контаминантом для санукитоидов, который смог бы обеспечить присутствие ксеногенных цирконов, понижение значений $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (Heilimo et al., 2013) и высокие значения μ , при невысоких значениях $\delta^{18}\text{O} (\text{Zrn})_{\text{ср.}} +5.5 \text{ SMOW}, \text{‰}$ (Heilimo et al., 2013), а также наблюдаемые особенности геохимического состава, являются ТТГ породы, слагающие значительную часть архейской коры БЩ.

Механизмы контаминации. Взаимодействие мантийного и корового вещества, которое привело к наблюдаемым мантийно-коровым характеристикам некоторых санукитоидов, могло происходить: (1) в зоне субдукции за счет метасоматоза пород мантийного клина флюидами/расплавами, отделившимися от океанической коры погружающейся плиты (Halla, 2005; Laurent et al., 2011); (2) при внедрении мантийных санукитоидных магм в кору, в том числе во время фракционной кристаллизации (механизм AFC) (Stevenson et al., 1999; Лобач-Жученко и др., 2010; Егорова, Лобиков, 2013); (3) за счет смешения расплавов из корового и обогащенного мантийного источников (Moyen et al., 2001). Можно предполагать совмещение нескольких механизмов.

Контаминация мантийного источника флюидами/расплавами, отделившимися от слэба в зоне субдукции. Коровая компонента в изотопном составе Pb, Nd и Hf санукитоидов Финляндии рассматривается как свидетельство коровой природы агентов метасоматоза мантии (Heilimo et al., 2013). Санукитоиды Финляндии имеют относительно гомогенный изотопный состав Pb и Nd в пределах одной интрузии и

существенные вариации между массивами. На этом основан вывод о смешении корового и мантийного вещества в источнике, где достигается максимальная степень гомогенизации (Heilimo et al., 2013). В качестве механизма взаимодействия предлагается метасоматоз мантийного клина продуктами дегазации и/или плавления терригенных осадков в зоне субдукции. Разный возраст осадков, по мнению авторов, и обеспечивает наблюдаемые вариации в изотопном составе между интрузиями (Heilimo et al., 2013).

Однако, наличие в строении санукитоидных интрузий ранних фаз основного состава, имеющих мантийный изотопный состав Pb, Nd, Sr и углерода (Лохов и др., 2008), при высоком содержании несовместимых элементов, не согласуется с коровой природой обогащения мантии.

Ассимиляция во время фракционной кристаллизации может объяснить увеличение $\mu(t)$ и уменьшение $\epsilon_{Nd}(t)$ в поздних (более кислых) фазах по сравнению с ранними фазами в санукитоидных массивах Бергаул и Панозеро. Такая же закономерность была установлена для санукитоидов Канады (Stevenson et al., 1999, Shirey, Hanson, 1986) и Анабарского щита (Гусев, Ларионов, 2012). Контаминация вмещающими ТТГ породами показана для второй (последней) фазы санукитоидного массива Таловейс (Западная Карелия) (Ларионова и др., 2007).

Смешение мантийного и корового расплавов. Модель, удовлетворительно описывающая этот процесс, была предложена для объяснения вариаций составов пород санукитоидного комплекса Клосепет (Индия) (Mouen et al., 2001). Смешение расплавов, в отличие от контаминации обломками твердых пород, может происходить в любых пропорциях и приводить к большей гомогенизации вещества.

Оценка объемной доли контаминации мантийных санукитоидных расплавов материалом коры была проведена с помощью метода, описанного в (Jahn et al., 2000). Были использованы параметры: для мантийного расплава - $\epsilon_{Nd}(t) = +1.7$ – среднее значение для санукитоидов, сохранивших мантийный изотопный состав Nd; для корового компонента - $\epsilon_{Nd}(t) = -6.5$ и -10.6 – состав ТТ-пород БЩ (Лобач-Жученко и др., 2000), пересчитанный на средний возраст санукитоидов БЩ (2.73 млрд лет); содержание Nd в мантийном расплаве 15-60 ppm (с учетом предполагаемой фракционной кристаллизации санукитоидных расплавов, предшествующей контаминации); содержание Nd в коре = 11, 17, 25 ppm (реальные содержания в ТТ-породах БЩ (Чекулаев, 1996)). Для расчета концентрации Nd (как и других элементов) в контаминированном расплаве использована классическая формула масс-баланса.

Расчеты показали, что мантийно-коровый Sm-Nd изотопный состав большинства санукитоидов Западной Карелии, Кольского п-ва, а также некоторых санукитоидов Восточной Карелии можно получить при смешении мантийных санукитоидных расплавов, частично претерпевших фракционную кристаллизацию, с корой ТТГ-состава в соотношении от 10:1 до 7:3. Эти результаты подтверждаются расчетами масс-баланса по главным и редким элементам.

Большую объемную долю контаминанта, требуемую для получения состава некоторых санукитоидов (массивы Каапинсалми, Бергаул), сложно обеспечить

контаминацией твердыми породами коры во время внедрения. Более подходящим механизмом является смешение расплавов из разных источников (метасоматизированной мантии и континентальной коры) во время внедрения и/или фракционной кристаллизации.

Подводя итог, можно сформулировать **второе защищаемое положение:**

Большинство умереннощелочных санукитоидов восточной части Фенно-Карельской провинции сохраняют мантийные изотопные характеристики: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)} = 0.7017 \pm 0.0005$, $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}_{(i)}$ (μ) 9.0 ± 0.2 , $\epsilon_{\text{Nd}}(t) +1.7 \pm 0.4$. Санукитоиды западной части Фенно-Карельской провинции и Кольско-Норвежской провинции, а также некоторые поздние фазы массивов на востоке Фенно-Карельской провинции имеют мантийно-коровые изотопные характеристики, что обусловлено контаминацией мантийных расплавов веществом коры ТТГ состава.

Состав и условия плавления мантийного источника санукитоидов. Высокая магнезиальность (mg# 0.5-0.7) и содержание Cr (>200ppm) в мафитовых фазах санукитоидов свидетельствуют, что их источником были породы мантии. Такие высокие концентрации Ba, Sr, LREE и щелочей, как в санукитоидах, невозможно получить ни при частичном плавлении перидотита (Stern, Hanson, 1991), ни при смешении базальтовых/коматиитовых расплавов с кислой корой (Stern et al., 1989; Самсонов и др. 2004). На этом основании сделан вывод, что источником санукитоидных магм являлась обогащенная несовместимыми элементами (метасоматизированная) мантия (Stern, Hanson, 1991 и др.).

Согласно работам (Ionov et al., 1998, 1993, 2002; Cvetkovic et al., 2004; Powell et al., 2004; Heaman et al., 2006; Kaeser et al., 2007; Raffone et al. 2009 и др.), метасоматоз мантийных пород приводит к формированию таких минералов, как Crx, Amp, Phl, Ap, Carb, Zrn и Rut, которые характеризуются высокими концентрациями несовместимых элементов. Плавление источника такого состава могло произвести высокомагнезиальные санукитоидные магмы, обогащенные K, Na, Ba, Sr, REE, Zr.

Низкое содержание HREE и Y в санукитоидах свидетельствует о формировании расплавов в поле стабильности граната. На диаграмме Tb/Yb - La/Yb по (MacDonald et al., 2001) средние составы ранних мафитовых фаз санукитоидных интрузий ложатся в область плавления мантийного гранатового лерцолита, при котором в рестите остается от 4 до 7 % граната. Обеднение санукитоидов HFSE могло обеспечить сохранение амфибола или рутила в рестите при процессах частичного плавления источника (Ionov, Hofmann, 1995; Xiong et al., 2005; Vigouroux et al., 2008).

Согласно экспериментальным данным минеральная ассоциация Ol + Opx + Crx + Amp + Phl + Gnt + Carb + Ap + Rut стабильна в мантии при T до 1150 °C в сухих условиях и до 1000°C - в водонасыщенных (рис. 7). Нижняя граница по давлению определяется совместной устойчивостью граната и карбонатов, а верхняя – амфибола, которые вместе дают диапазон P ~ 15 - 30 кбар, сужающийся при приближении к температурам солидуса. Чтобы началось плавление метасоматизированного мантийного лерцолита необходимо изменение условий:

добавление в систему воды, которая понижает температуру солидуса, либо увеличение РТ параметров.

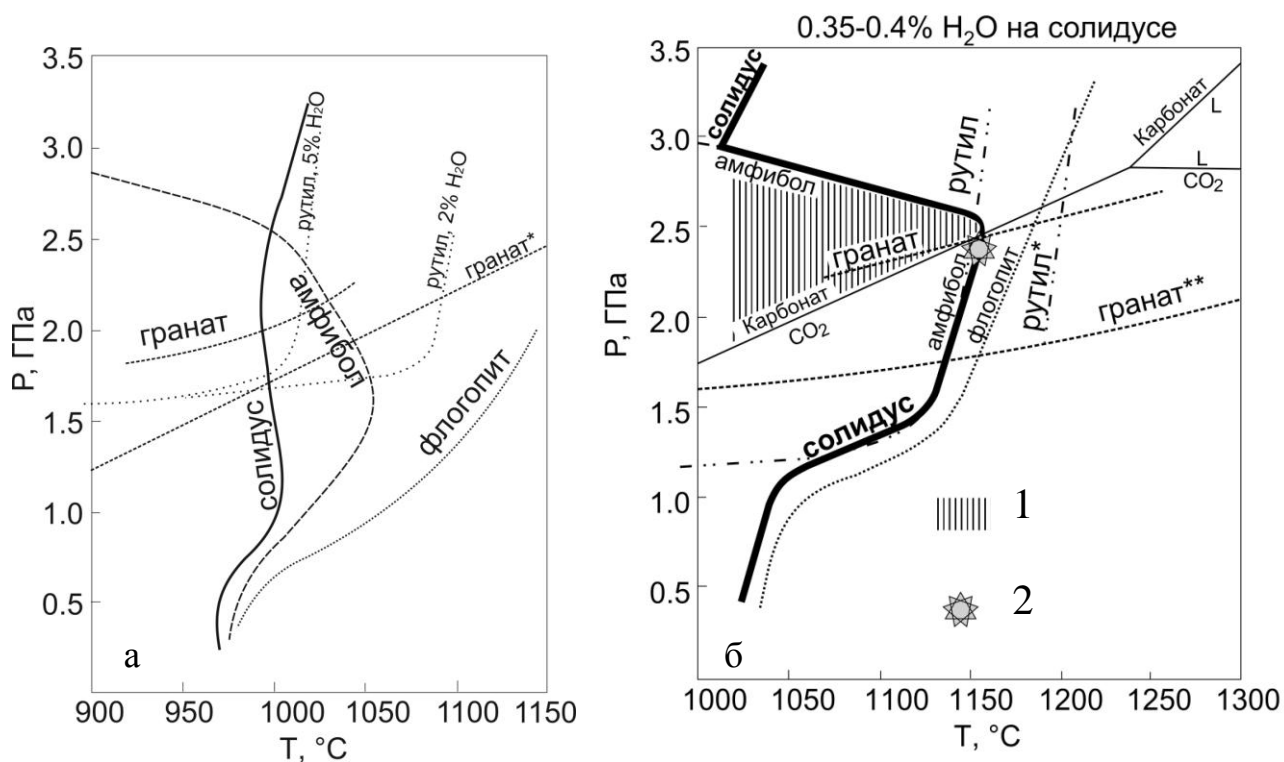


Рис. 7. Поля устойчивости минералов в метасоматизированном мантийном перидотите в условиях водного насыщения (а), в условиях дегидратационного плавления (б). Данные о соотношениях ниже 1.5 ГПа по (Conceicao, Green, 2004), выше 1.5 ГПа по (Mengel, Green, 1989). Дополнительно: поля стабильности рутила по (Xiong et al., 2005), рутил* - предел устойчивости рутила при плавлении в сухих условиях по (Klemme et al., 2002). Линии фазовых переходов CO_2 -карбонат-L (расплав) в мантийном лерцолите даны по (Lee, Wyllie, 2000). Гранат* - предел устойчивости граната при частичном плавлении лерцолита с повышенным содержанием CaO (8%) и Al_2O_3 (8%) по (Майсен и Бетчер, 1979), гранат** - линия перехода шпинелевого лерцолита в гранатовый лерцолит по (Klemme, O'Neill, 2000). На рис. (б) показаны: поле стабильности метасоматизированного источника санукитоидов (1) и область его частичного плавления (2).

При плавлении в водонасыщенных условиях флогопит устойчив в мантии при температурах солидуса (рис. 7а), тогда как для получения состава санукитоидного расплава (повышенное содержание K_2O) необходимо его разрушение. В условиях дефицита воды линия устойчивости флогопита приближена к линии солидуса (рис. 6б), и флогопит в поле стабильности граната начинает разрушаться при T выше 1150°C (Wendlandt, Eggler, 1980). Для насыщения расплава CO_2 должно происходить разрушение карбонатов, поэтому давление в области плавления должно быть ниже линии их устойчивости (< 25 кбар) (рис. 7б). Следовательно, только дегидратационное плавление в узком РТ – диапазоне: $T = 1150 - 1160^\circ\text{C}$, $P = 24 - 25$ кбар, удовлетворяет всем выше заданным условиям формирования санукитоидных расплавов: сохранение граната в рестите, частичное разрушение флогопита и дегазация карбонатов (рис. 7б).

При дегидратационном плавлении граница поля устойчивости амфибола совпадает с линией солидуса (рис. 7б), что исключает его присутствие в рестите и, следовательно, контроль HFSE. Другой фазой, контролирующей содержание HFSE в расплаве, является рутил. Температура стабильности рутила сильно зависит от объемной доли воды в системе (рис. 7б) (Xiong et al., 2005). В условиях дегидратационного плавления рутил будет присутствовать в рестите до $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Rapp, Watson, 1995), в сухих условиях - до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 7б). Поэтому есть вероятность, что при формировании санукитоидных расплавов часть рутила сохранялась в рестите.

Полученные выше выводы позволяют сформулировать **третье защищаемое положение:**

Формирование мантийных санукитоидных расплавов происходило в условиях дегидратационного плавления метасоматизированного гранатового лерцолита, при P около 24 кбар и T около $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного комплексного анализа геологического строения, петрографического, химического и изотопно-геохимического составов пород и минералов большинства интрузий санукитоидов Балтийского щита в дополнение к защищаемым положениям можно сделать следующие выводы.

К моменту становления санукитоидных интрузий архейский фундамент Фенно-Карельской кратона был практически сформирован: санукитоиды секут многократно деформированные и метаморфизованные породы ЗКП и ТТГ-ассоциации.

Становление санукитоидных интрузий происходило почти синхронно на всей территории Балтийского щита (наблюдается лишь незначительное уменьшение возраста интрузий в северо-западном направлении), что свидетельствует о существовании к этому моменту на Балтийском щите единого тектонического режима. Следующий этап 2.7 – 2.63 млрд лет – гранитообразования, формирования анорогенных магматических комплексов, локального метаморфизма гранулитовой фации, проявленный одновременно по всему Балтийскому щиту, подтверждает этот вывод.

Мантийный источник санукитоидных магм Балтийского щита был сформирован в результате метасоматоза субконтинентальной литосферной мантии, отвечающей по составу гранатовому лерцолиту. Агентами метасоматоза были глубинные С-О-Н – флюиды, обогащенные щелочами, Ва, Sr и LREE. Последующий прогрев литосферы до температуры немного выше 1150 °С привел к плавлению метасоматизированной мантии в равновесии с $\pm \text{Rut} \pm \text{Ap} + \text{Grt} + \text{Phl} + \text{CPx} + \text{OPx} + \text{Ol}$ реститом и образованию санукитоидных расплавов.

Часть мантийных санукитоидных расплавов испытала контаминацию породами/расплавами ТТГ-состава в процессе внедрения и взаимодействия с породами коры и/или в процессе фракционной кристаллизации, что отразилось на конечном геохимическом и изотопно-геохимическом составе некоторых санукитоидов БЩ. Поэтому мантийно-коровые изотопные характеристики не должны использоваться при моделировании состава и условий образования метасоматизированного мантийного источника санукитоидов.

Sm-Nd, Rb-Sr, U-Pb изотопные системы пород и минералов многих санукитоидных массивов претерпели частичную перестройку в результате палеопротерозойского метаморфизма, что необходимо учитывать при интерпретации полученных данных.

Модель обогащения мантии несовместимыми элементами в результате взаимодействия пород мантийного клина и флюидов/расплавов, отделившихся от погружающейся океанической плиты в зоне субдукции, не подходит для объяснения наблюдаемых изотопно-геохимических характеристик санукитоидов и их вариаций.

Наиболее удовлетворительно широкое проявление санукитоидного магматизма на Балтийском щите в неоархее объясняет модель поднятия мантийного плюма или астеносферного диапира.

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

Лохов К.И., Егорова Ю.С., Лобач-Жученко С.Б., Арестова Н.А., Гусева Н.С., Астафьев Б.Ю. Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов из архейских санукитоидных интрузий Карелии: к проблеме мантийного флюида // Региональная геология и металлогения. 2008. №36. С. 28-39.

Егорова Ю.С., Лобиков А.Ф. Изотопный состав свинца и неодима санукитоидов Карелии как свидетельство их гетерогенной природы // Доклады АН, 2013. Т. 453. № 2. С. 196-200.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации в других изданиях

Гусева Н.С., Егорова Ю.С. Магнезиальные и железистые породы повышенной щелочности позднеархейского возраста. Одна нерешенная задача // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. Тезисы XVIII молодежной конференции, посвященной памяти К.О. Кратца. СПб, 2007. С. 50-52.

Егорова Ю.С. Архейские серии умеренно-щелочных пород Карелии на примере Эльмусского санукитоидного и Западно-Хижьярвинского сиенитового массивов // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Печерского сегмента. Материалы 16-й науч. конф. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар. 2007. С. 51-53.

Егорова Ю.С. Первые данные об изотопном составе Nd в апатитах архейских санукитоидных Эльмусской и Шаравалампинской интрузий // Мат.-лы XIX конф. молодых ученых, посвященной памяти К. О. Кратца. Апатиты, 2008. С. 79-81.

Егорова Ю.С. Позднеархейские серии умеренно-щелочных пород Карелии на примере санукитоидного Эльмусского и сиенитового Западно-Хижьярвинского массивов // Сборник трудов молодых ученых ИГГД РАН. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. С. 134-160.

Гусева Н.С., Егорова Ю.С. Минералогические свидетельства метасоматоза в породах Панозерского санукитоидного комплекса (Центральная Карелия) // Сборник трудов молодых ученых ИГГД РАН. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. С. 161-168.

Егорова Ю.С. К проблеме контаминации мантийных санукитоидных расплавов веществом континентальной коры // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. Материалы XXIII молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти К.О. Кратца. Петрозаводск, 2012. С. 33-36.

Егорова Ю.С., Лохов К.И. Коровая контаминация мантийных санукитоидных расплавов по данным геохимии радиогенных изотопов Hf и Nd // Материалы III международной научно-практической конференции памяти А.П. Карпинского. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. С. 747-751.

Egorova Yu. The geochemical and isotopic composition of neoarchean sanukitoids from eastern Karelia, Baltic Shield // Abstracts of the 4th International students geological conference. Brno, 2013. P.36.

Егорова Ю.С. Санукитоиды Карелии: состав, строение, источники // Материалы Всероссийской (с международным участием) конференции. Апатиты, 2013. С. 43-44.

Егорова Ю.С. Фанерозойские аналоги архейских санукитоидов Балтийского щита // Материалы XXIV молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти К.О. Кратца. Апатиты, 2013. С. 92-95.