

На правах рукописи



Кучеровский Глеб Алексеевич

**АРХЕЙСКИЙ ИНТРУЗИВНЫЙ БАЗИТОВЫЙ
МАГМАТИЗМ ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЫ ВОДЛОЗЕРСКОГО
ДОМЕНА КАРЕЛЬСКОЙ ПРОВИНЦИИ
ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА (ЭТАПЫ, ГЕОХИМИЯ,
ИСТОЧНИКИ)**

Специальность 1.6.3– Петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2025

Диссертация выполнена в ФБГУН «Институт геологии и геохронологии докембрия Российской Академии Наук»

Научный руководитель:

Арестова Наталья Александровна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики Института геологии и геохронологии докембрия (ИГГД РАН), г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты:

Светов Сергей Анатольевич, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геологии КарНЦ РАН

Хромых Сергей Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, Заместитель директора по научной работе ИГМ СО РАН,

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр "Кольский научный центр
Российской академии наук"

Защита состоится «15» мая 2025 года в 14.00 часов на заседании
Диссертационного совета 24.1.050.01, созданного на базе ФБГУН ИГМ
СО РАН, в конференц-зале (630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3).

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с
требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:
630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Котлярову А.В. Тел./факс:
+7 (383) 373-03-28; +7(383) 373-05-61, e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
ФБГУН ИГМ СО РАН
https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/kucherovskiy/dis-Kucherovskiy.pdf.

Автореферат разослан «11» апреля 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.050.01, к.г.-м.н.

А.В. Котляров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время в литературе широко обсуждается вопрос, какие условия формирования базитовых расплавов существовали на Земле на ранних стадиях её развития (Condie, 2010, 2016, 2017; Wyman, 2018; Pears, Reagan, 2019). Изучение данной проблемы напрямую связано с такими фундаментальными задачами, как определение геодинамических обстановок ранней Земли, установление тектонических режимов формирования древней коры. Ответ на этот вопрос можно получить, исследуя основные магматические породы: особенности их химического и изотопного состава несут информацию о процессах, происходивших в мантии в момент их образования.

Для западной окраины Водлозерского домена Карельской провинции были предложены различные модели формирования коры, приуроченные к различным геодинамическим обстановкам. (Светов, 2005, 2009; Слабунов 2008; Арестова и др. 2012, 2015). Появление новых, в том числе локальных, аналитических методов позволяет заполнить пробелы в этих моделях и более детально реконструировать геологическую историю раннего Докембрия этой территории, что и обуславливает актуальность данной работы.

Объект исследования

Диссертационное исследование посвящено изучению архейских интрузивных базитов Палаламбинской и Остерской мезоархейских зеленокаменных структур, входящих в состав единого Сегозерско-Водлозерского зеленокаменного пояса, расположенного на западной окраине Водлозерского домена, самого древнего из трёх доменов в Карельской провинции Фенноскандинавского щита с возрастом ТТГ фундамента 3.24-3.15 млрд лет (Чкукулаев и др., 2009; Арестова и др. 2012).

Цель работы - установление времени внедрения, условий образования и эволюции расплавов базитового состава мезо- и неоархейского возраста на западной окраине Водлозерского домена Карельской провинции.

Для достижения цели исследования последовательно решались следующие задачи:

Изучение геологического строения северо-западной окраины Водлозерского домена в пределах опорных участков.

Выделение основных этапов базитового магматизма на основе геологических и изотопно-геохимических данных.

Выявление особенностей химического состава базитовых интрузий по главным, редким и редкоземельным элементам.

Определение условий магмообразования для каждого из выделенных этапов методами численного моделирования по главным и редким элементам.

Методология и методы исследования:

Методологической основой исследования является научный подход с комплексным применением современных геохимических и изотопно-геохимических методов. В диссертации были использованы образцы пород, собранные автором в составе коллектива ИГГД РАН в ходе полевых работ в 2009-2018 гг. Дополнительно в работе использовались образцы, отобранные в пределах опорных участков сотрудниками Карельской группы лаборатории геологии и геодинамики ИГГД РАН ранее. Изученная коллекция состоит из 82 образцов, отобранных из всех разновидностей основных пород в пределах опорных участков. Химический состав петрогенных (главных) элементов в породах определен в ЦЛ ВСЕГЕИ методом XRF на спектрометре ARL-9800 и в ИГГД РАН на приборе VRA-30, содержание редких и редкоземельных элементов в породе проанализировано методом ICP-MS на масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 по стандартным методикам (ВСЕГЕИ). Состав минералов исследован в ИГГД РАН на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) (~350 точек). Анализ циркона на содержание редких и редкоземельных элементов (10 анализов) выполнен методом SIMS на ионном зонде Cameca IMS-4f (Ярославский филиал ФТИАН РАН). Локальное датирование циркона U-Pb методом выполнено на ионном зонде высокого разрешения SHRIMP-II в ЦИИ ВСЕГЕИ. Измерение Sm-Nd системы валового состава породы (15 образцов) выполнено методом ID-TIMS в ИГГД РАН.

Научная новизна работы:

Для базитовых интрузий Палаламбинской и Остерской зеленокаменных структур установлена последовательность внедрения, выделены 4 этапа интрузивного базитового магматизма.

Выявлены особенности химического состава, характерные для пород разных этапов. Показано сходство химического состава расплавов первого и четвёртого этапов. Установлена комагматичность интрузивных пород I этапа и коматиит-базальтовых вулканитов зеленокаменных поясов.

Составлены и рассчитаны петрогенетические модели образования и эволюции расплавов пород выделенных этапов, определены РТ- параметры образования расплавов. Показано, что расплавы первого, третьего и четвёртого магматических этапов зарождались в условиях, характерных для поднятия мантийных плюмов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученные результаты позволяют сделать выводы о природе магматических процессов, происходивших в нео- и мезоархее на западной окраине Водлозерского домена. Формирование расплавов в условиях, характерных для поднятия мантийного плюма позволяют уточнить существующие геодинамические модели образования зеленокаменных поясов.

Определение возраста внедрения магматических пород, секущих те или иные супракрустальные толщи, помогает решить актуальную задачу расчленения пород архейского фундамента. Знание геохимических особенностей, присущих породам каждого из этих этапов, позволяет провести корреляцию между интрузивными телами этого района вне опорных участков. Это может быть использовано при проведении геологического картирования архейских образований Водлозерского домена и при составлении местной стратиграфической шкалы.

Полученные результаты использованы в рамках темы НИР FMUW-2022-0004 «Глобальные рубежи формирования и эволюции континентальной коры и литосферой мантии древних щитов фундамента Восточно-Европейской платформы и Восточной

Сибири: петрологические и изотопно-геохимические свидетельства, геодинамические и металлогенические следствия».

Соответствие результатов работы научным специальностям:

Результаты работы соответствуют пункту 1 (магматическая геология) и 2 (магматическая петрология) паспорта специальности 1.6.3.

Апробация результатов: Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Конференция памяти Г.М. Саранчиной и Ф.Ю. Левинсона-Лессинга «Современные проблемы магматизма и метаморфизма». СПбГУ. 2012; XXIII молодёжная научная школа-конференция памяти К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии». Петрозаводск. 2012; XXIV молодёжная научная школа-конференция памяти К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии». Апатиты. 2013; XXV молодёжная научная школа-конференция памяти К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии». СПб. 2014; IX Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия». Черноголовка, 2018.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, в анализе научной литературы по теме работ, участии в полевых работах и отборе образцов, получении и обработке аналитических данных, разработке петрогенетических моделей и интерпретации результатов.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus и Web of Science.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 2 приложений. Диссертация изложена на 136 страницах, содержит 75 рисунков и 12 таблиц. Список литературы включает 95 наименований.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю д.г.-м.н., Н.А.

Арестовой за всестороннюю поддержку. Автор благодарит В. П. Чекулаева, С.Г. Скублова и А.Б. Вревского за помощь в процессе работы и обсуждение результатов. За успешное совместное проведение полевых работ автор благодарит Ю.С. Егорову, А.В. Юрченко и Т.А. Мыскову. Также автор выражает отдельную благодарность Е.Н. Лепёхиной за помощь в изучении циркона и О.М. Туркиной за конструктивные замечания, позволившие существенно улучшить структуру работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава описывает геологическое строение района проведения работ и кратко излагает историю его изучения. В главе дана характеристика опорных участков, в пределах которых изучались базитовые интрузии западной окраины Водлозерского домена.

Вторая глава посвящена геологии и петрографии исследованных базитов. Здесь приводятся их геологические соотношения друг с другом и другими породами, распространёнными в пределах опорных участков. На основании проведённого исследования базитов обосновано выделение 4-х магматических этапов их проявления.

В *третьей главе* приведены результаты изучения акцессорного циркона в породах выделенных магматических этапов. Приводятся сведения о морфологии циркона, химическом составе и составе U-Pb системы. На основании полученных определений возраста сформулировано первое защищаемое положение, которое постулирует возраст выделенных магматических этапов.

В *четвёртой главе* дана характеристика химического состава базитов интрузий, проведено сравнение пород разных магматических этапов. На основании проведённого сравнения установлены сходства и различия химического состава пород разных этапов. Эти выводы изложены во втором защищаемом положении.

Пятая глава посвящена процессам образования расплавов выделенных магматических этапов. В ней описаны подходы и методы моделирования условий зарождения и эволюции расплавов пород различных этапов. На основании геохимических и изотопно-

геохимических данных определяется источник расплава. Приведены расчёты Р-Т параметров зарождения и эволюции расплавов. На основании произведённых петрогенетических построений сформулировано третье защищаемое положение, которое даёт характеристику мантийным источникам магматических этапов.

Заключение содержит обобщенные выводы по результатам исследования в соответствии с целью и решаемыми задачами.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Карельская провинция Фенноскандинавского щита образована тремя разновозрастными доменами: древними Водлозерским и Западно-Карельским и разделяющим их более молодым Централно-Карельским доменом. Водлозерский домен – крупный и наиболее древний фрагмент архейской коры Фенноскандинавского щита (Ранний докембрий...2005) слагает юго-восточную часть Карельской провинции (рис. 1). В его восточном и западном обрамлении широко развиты зеленокаменные пояса – древнейшие вулканогенно-осадочные комплексы. В качестве опорных участков были выбраны Остерская и Палаламбинская зеленокаменные структуры Сегозерско-Водлозерского зеленокаменного пояса западной части домена. Эти структуры хорошо обнажены и доступны для изучения.

Уникальной особенностью мезоархейской **Палаламбинской зеленокаменной структуры** является непосредственное залегание вулканитов на породах древнего тоналитового фундамента с возрастом 3,15 млрд лет (Арестова и др., 2012). Породы фундамента с запада перекрыты вулканитами зеленокаменного пояса, которые прорываются трондьемитами, габбро и калиевыми гранитами (Геология и петрология... 1978; Зеленокаменные пояса...,1988) (рис. 2а). На юге архейские породы скрыты под протерозойскими осадками.

Исследуемые породы представлены дайками и малыми интрузиями четырёх групп, отличающихся геологическим положением и составом. К первой относится дайка габбро I (Рис. 2а), расположенная в тоналитах фундамента. Её секут жилы

трондьемитов и дайка позднего габбро IV. Ко второй группе относятся дайки габбро и диоритов II С-З простирания, секущие тоналиты и трондьемиты. Третья группа представлена небольшими интрузиями лейкогаббро III, секущими вулканиты зеленокаменного пояса и трондьемиты, и четвёртая – дайками габбро ССВ простирания, секущими все породы в пределах опорного участка.

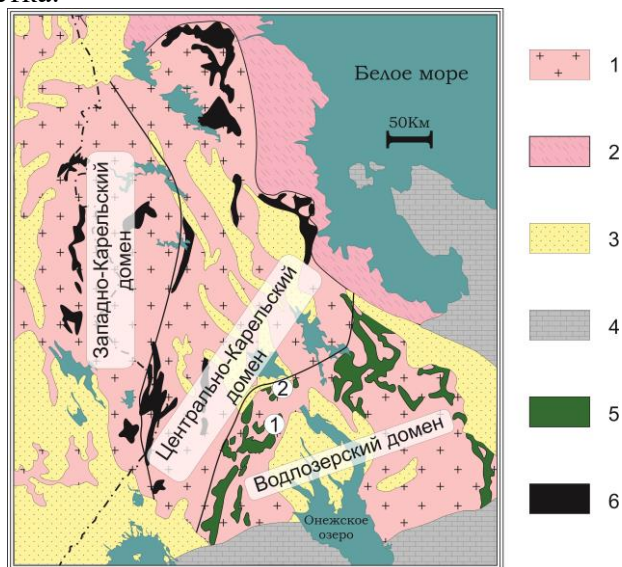


Рис.1 Схема разделения Карельской гранит-зеленокаменной области на домены составлена на основе (Лобач-Жученко и др., 2000; Ранний докембрий..., 2005) 1 – ТТГ фундамента; 2 –Беломорский складчатый пояс; 3 – протерозойские образования; 4 – платформенный чехол. Зеленокаменные пояса с возрастом: 5 - 3.02-2.85 млрд лет (Арестова и др. 2012 лет; Лобач-Жученко и др 1999; Puhtel et al, 1999) 6 – 2.85-2.7 млрд лет;(Puhtel et al, 1998; Лобач-Жученко и др 2000) (Цифры в кружках – районы проведения работ: 1 – Палая Ламба; 2 – оз. Остер.

Район Остерозера (рис. 26) находится к северу от Палой Ламбы. В строении Остерской зеленокаменной структуры выделяются два комплекса пород, разделенные образованием терригенных пород, включая полимиктовые конгломераты. К нижнему комплексу относят базальты, андезиты, трондьемиты, высокомагнезиальные диориты и секущие их интрузии габбро-анортозитов.

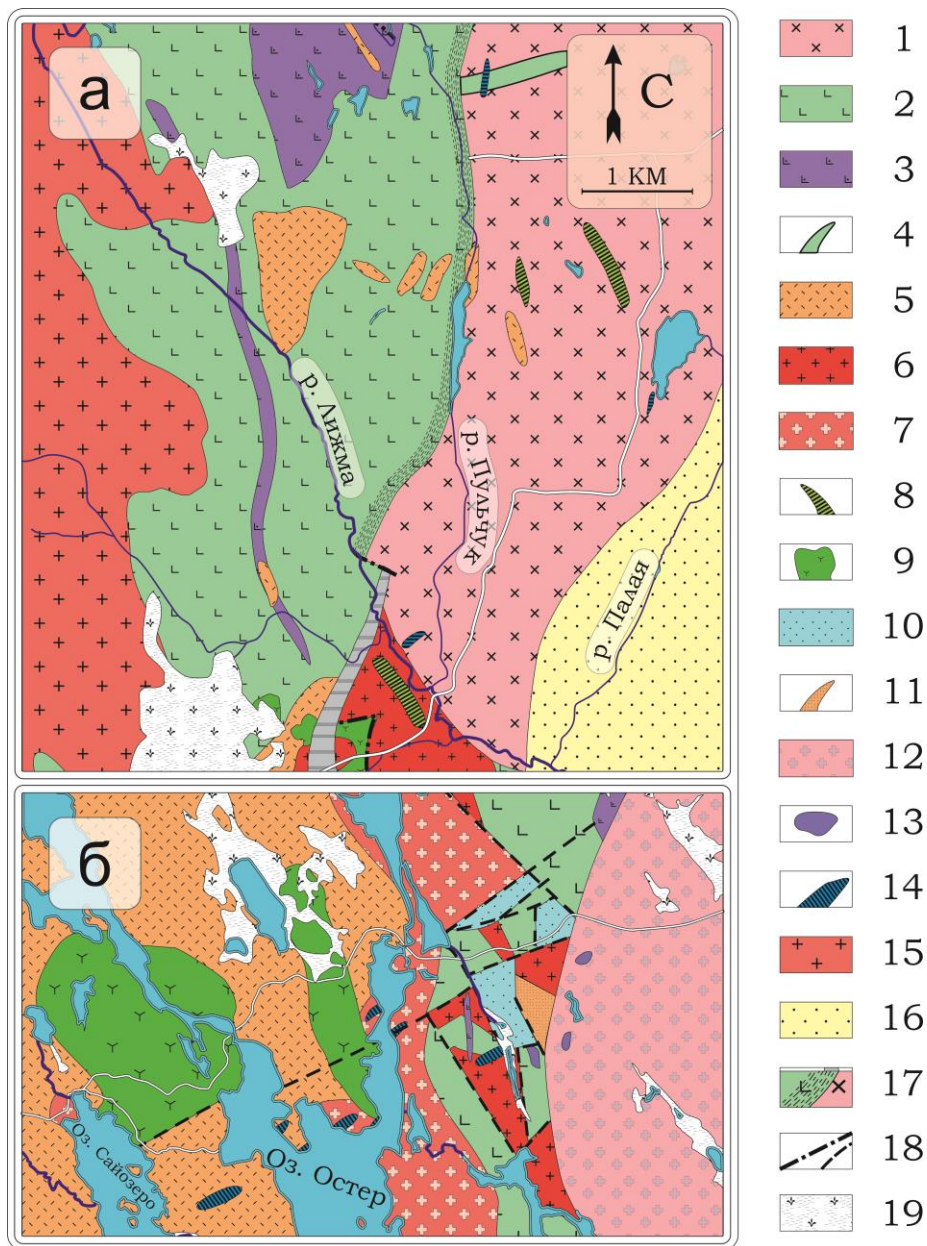


Рис. 2. Геологические карты р-нов Палой Ламбы (а) и оз. Остер (б) (составлены на основе (Геология и петрология... 1978) с дополнениями автора). 1 – тоналит; 2 – базальт; 3 – коматиит; 4 – габбро I этапа; 5 – андезит; 6 – трондьемит; 7 – плагиогранит; 8 – интрузии II этапа; 9 –

интрузии III этапа; 10 – конгломерат; 11 – андезит II; 12 – гранит (массив Гейне-Оя); 13 – дифференцированные интрузии IV этапа; 14 – дайки габбро IV этапа; 15 – микроклиновый гранит; 16 – протерозойские отложения; 17 – зона интенсивного рассланцевания; 18 – разрывные нарушения; 19 – четвертичные отложения.

Возраст трондьемитов 2917 млн лет, габбро – анортозитов 2860. Верхний комплекс представлен терригенными породами, субвулканическим комплексом пород средне-кислого состава и прорывается гранитоидами и телами базитов и ультрабазитов. Все породы нижнего комплекса присутствуют в гальках конгломератов. В восточной части района обнажен купол гнейсо-гранитов. Вдоль контакта с куполом супракрустальные породы подвергнуты значительной тектонической дезинтеграции.

Исследуемые базиты представлены дайками и интрузиями трёх групп которые, как будет показано ниже, коррелируют с базитами II-IV этапов района Палой ламбы. Базиты I этапа отсутствуют. Ко II этапу отнесена дайка высокомагнезиальных диоритов (рис. 2а) С-З простираения, секущая вулканы зеленокаменного пояса. III - крупные интрузии габбро-анортозитов, секущие андезиты и плагиограниты. К IV этапу относятся расслоенные интрузии базит-улабазитового состава, крупные дайки габбро и– дайки С-В простираения, которые секут все породы района, кроме пегматитовых жил.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение: в пределах западной окраины Водлозерского домена проявлены четыре последовательные этапа архейского интрузивного базитового магматизма с возрастом 3,02, 2,89, 2,86 и 2,72 млрд лет.

На основе комплексного изучения особенностей геологического положения и петрографического состава можно сделать несколько выводов о корреляции исследуемых тел. Для определения последовательности магматических событий и выделения этапов магматической активности установлены геологические соотношения исследованных базитов как между собой, так с другими породами, распространёнными в пределах опорных участков.

Для уточнения времени образования базитов и их положения в шкале последовательности событий было проведено исследование акцессорного циркона базитов каждого магматического этапа.

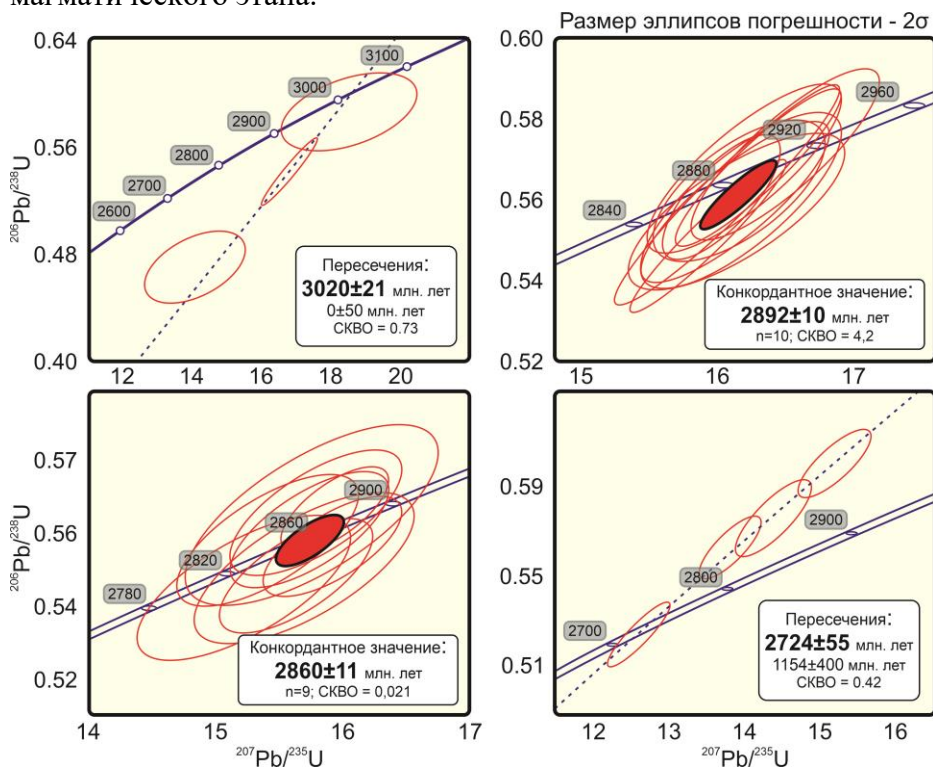


Рис. 3. Результат измерения U-Pb изотопной системы в цирконах, выделенных из габбро первого (а) и диоритов второго (б) этапов Палаламбинской структуры; габбро-анортозитов третьего (в) и габбро дайки четвёртого (г) этапов Остерской структуры.

Циркон был исследован в проходящем и отраженном свете, также в CL и BSE изображениях. В зёрнах, использованных для определения возраста, было измерено содержание редкоземельных элементов, их распределение подтвердило магматическую природу изученного циркона. Полученные геохронологические данные (рис. 3) подтверждают, что в пределах исследованных участков Водлозерского домена проявлены четыре разновозрастных этапа

архейского интрузивного базитового магматизма с возрастом 3.02, 2.89, 2.86 и 2.72 млрд лет (Таблица 1).

Таблица. 1 Значения возраста (млн. лет) приведены из (Арестова и др. 2017)

Район озера Остер	Район Палой Ламбы
Калиевые гранитоиды	Калиевые гранитоиды (2674)
Дайки габбро (2724)	Дайки габбро
Расслоенные интрузии	
Гранитоиды «Гейне-оя»	
Остерские гранитоиды	
Интрузии средне-кислого состава	
Терригенные породы	
Габбро-анортозиты (2860)	Габбро-лейкогаббро (2840)
Высокомагнезиальные диориты	Высокомагнезиальные диориты и габбро (2892)
Трондьемиты (2917)	Трондьемиты (2903)
Андезиты	Андезиты (2919)
Базальты, коматииты	Базальты, коматииты, габбро (3020)
	Тоналиты фундамента (3141)

Второе защищаемое положение: интрузивные базиты каждого этапа отличаются особенностями химического состава. Так для пород I этапа характерно недифференцированное распределение редких и редкоземельных элементов; II этапа – высокая магнезиальность при низком содержании титана, обогащение крупноионными элементами и низкое $(Nb/La)_n$ отношение; III этапа – отрицательная аномалия HFS-элементов на фоне обогащённого распределения редких элементов, IV – недифференцированное или обогащённое распределение редких и редкоземельных элементов.

Проведено сравнение химического состава разных групп пород (рис. 4).

Породы I этапа не обнаруживают признаков контаминации или дифференциации расплава. Содержание редких и главных элементов аналогично таковому в базальтах зеленокаменного пояса. Высокая магнезиальность и недифференцированное распределение РЗЭ, примерно в 5 раз превышающее содержания в примитивной мантии указывают на образование расплава в условиях высоких степеней плавления примитивного мантийного источника.

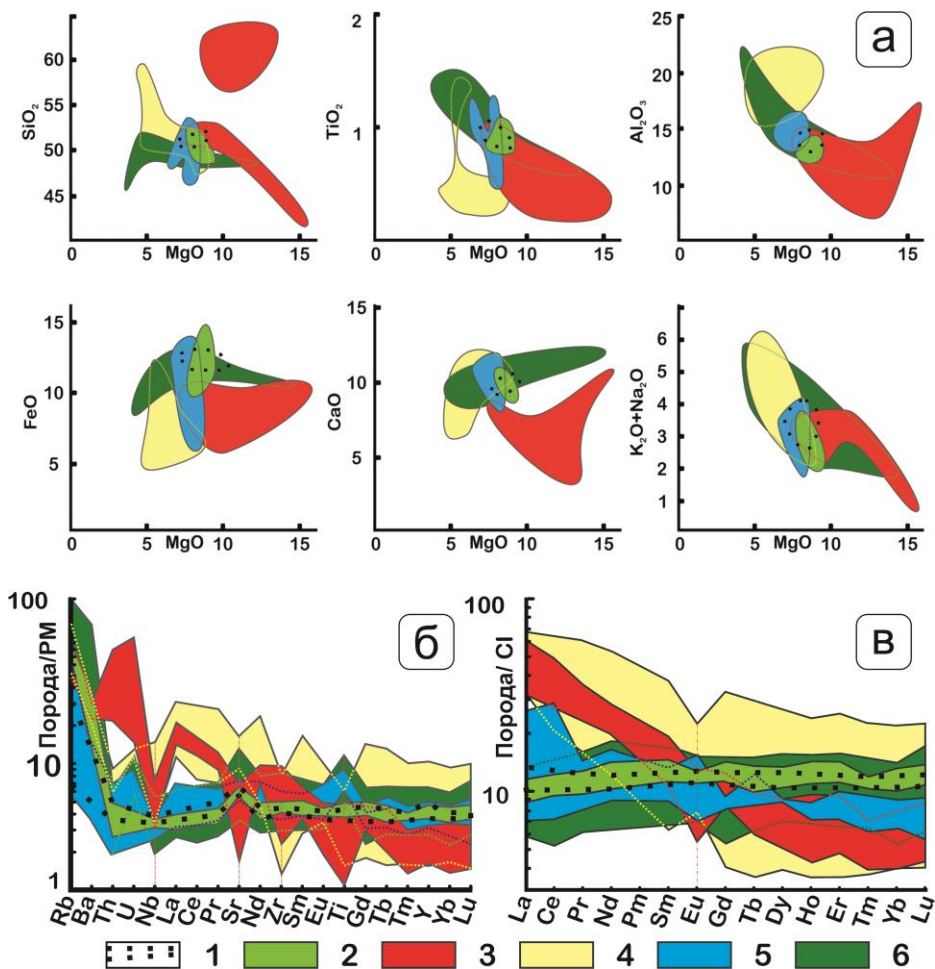


Рис. 4. Сравнение химического состава исследованных пород: а - бинарные диаграммы; б – спайдер-диаграмма; в – спектр

распределения РЗЭ. Породы: 1 – I этапа (базальтов ЗКП); 2 – I этапа (габбро); 3 – II этапа (высокомагнезиальные диориты и габбро); 4 – III этапа (габбро-анортозиты); 5 – расслоенные интрузии р-на Остерозера IV этапа; 6 – даек габбро р-на Остерозера IV этапа.

Высокомагнезиальные породы II этапа, образуют две контрастные группы, по содержанию в них кремнезёма, но высокая магнезиальность, низкое содержание титана, обогащённый спектр распределения редких элементов позволяет отнести их к одному магматическому этапу. Высокая магнезиальность при большом содержании кремнезёма в этих расплавах может быть следствием инконгруэнтного плавления ортопироксена, что указывает на деплетированный мантийный источник (Lobach-Zhuchenko et al., 1998; Arestova et al., 2003). Характерными для этих пород являются значительные отрицательные аномалии Nb Ti, указывающие на присутствие амфибола или флогопита в рестите.

Высокоглинозёмистые габбро III этапа, образующие крупные тела в обоих опорных участках, не имеют существенного различия в составе главных элементов, имеют заметно разницу в редкоэлементном составе. Так, степень обогащения тяжёлыми редкоземельными элементами и различное направление европиевой аномалии указывают на различные пути эволюции расплава.

Интрузии IV этапа в пределах разных опорных участков отличаются разнообразием химических составов. В рамках автореферата будут рассмотрены только породы района Остерозера потому, что все петрологические расчеты выполнены именно для них. Химический состав даек СВ простираения характеризуется трендами повышения содержаний TiO_2 , Al_2O_3 и MgO . Содержание главных элементов расслоенных интрузий совпадает с таковым в дайках СВ простираения, но при этом характеризуется трендом понижения содержания TiO_2 и FeO . Область совпадения химического состава даек и расслоенных интрузий IV этапа в целом соответствует химическому составу базальтов и габбро I этапа. Это позволяет предположить, что исходный расплав имел состав, близкий к составу пород I этапа, а вариации состава вызваны фракционированием в процессе эволюции расплава.

Распределение REE в дайках СВ простираения имеет недифференцированный характер, содержания REE в 2.5-20 раз превышают содержания в примитивной мантии. В большинстве расслоенных интрузий, напротив, наблюдается обогащение LREE и разнонаправленная Eu-аномалия, что, вероятно, является следствием дифференциации расплава. Для всех поздних базитов Остерозера характерна также положительная аномалия Ti, сходные отношения Cr/Ni, Ti/Zr, Zr/Y. Эти сходства химического состава указывают на сходные условия образования и состав источника для обеих групп пород.

Таким образом, сравнение химического состава показало существенные различия между выделенными группами пород. Ранние габбро Палой Ламбы возможно получить прямым плавлением примитивной мантии. Породы II этапа демонстрируют особенности, указывающие на плавление гидратированного мантийного источника. Состав габбро-анортозитов III магматического этапа района Остерозера демонстрирует признаки контаминации расплава коровым веществом, на что указывает различие между $(La/Sm)_n$ и $(Gd/Yb)_n$. В районе Остерозера мы наблюдаем две группы тел IV этапа, различного химического состава. Наличие расслоенности и вариаций состава говорит о сложной эволюции расплава, в то же время содержания REE свидетельствуют о высоком проценте плавления.

Третье защищаемое положение: для магм I, III и IV этапов по изотопному составу Nd источником расплава выступала деплетированная лерцолитовая мантия, для расплавов второго этапа источником была обогащенная метасоматизированная литосферная мантия.

На основании результатов изучения химического состава пород четырёх выделенных этапов, были сделаны выводы о происхождении и эволюции расплавов, характерных для этих этапов. Для этого были определены характеристики мантийного источника, созданы модели образования расплава и произведена оценка P-T параметров, при которых возможно образование расплава соответствующего химического состава.

Для оценки мантийного источника изучена изотопная система Nd (Рис. 5). Рассчитанные значения $\epsilon_{Nd}(t)$ для пород I этапа: 1.7 – 3.6, II этапа: -1.9 – -0.1, III этапа: 2.4 – 3.6, IV этапа: -0.1 – 2.5. Положительные значения $\epsilon_{Nd}(t)$ указывают на то, что расплав данного этапа отделился от мантийного протолита, который испытывал плавление ранее в процессе своей эволюции. Отрицательные значения, характерные для пород II этапа, можно интерпретировать как влияние контаминации расплава коровым веществом (что не подтвердилось расчётами) или же как следствие плавления обогащённого радиогенным Nd источника.

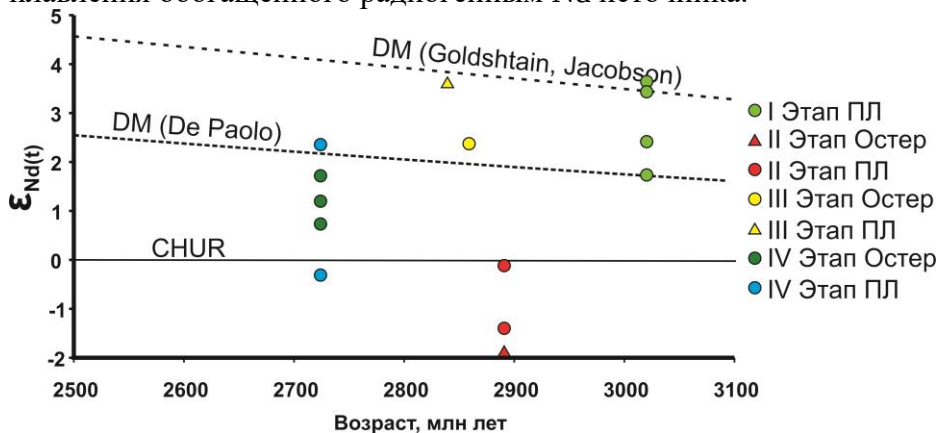


Рис. 5. Параметр $\epsilon_{Nd}(t)$ пород выделенных этапов.

Для определения мантийного источника расплавов использованы классификационные диаграмма К. Конди Nb/Y - Zr/Y (Condie, 2005) (Рис. 5a), Nb/Th-Zr/Nb (Condie, 2015) (рис. 5б). Они позволяют не только дискриминировать глубинные и малоглубинные источники, но также предположить, к какому мантийному резервуару относился протолит. Так составы базитов I и IV этапов расположены преимущественно вблизи резервуара РМ (большинство точек лежат выше линии ΔNb), а составы базитов II этапа тяготеют к обогащенному источнику (EN).

Для оценки вклада разных магматических источников кроме петрогенетических диаграмм Конди, целесообразно использовать петрогенетическую диаграмму Дж. Пирса, использующую другие элементные отношения, (Pearce, 2021).

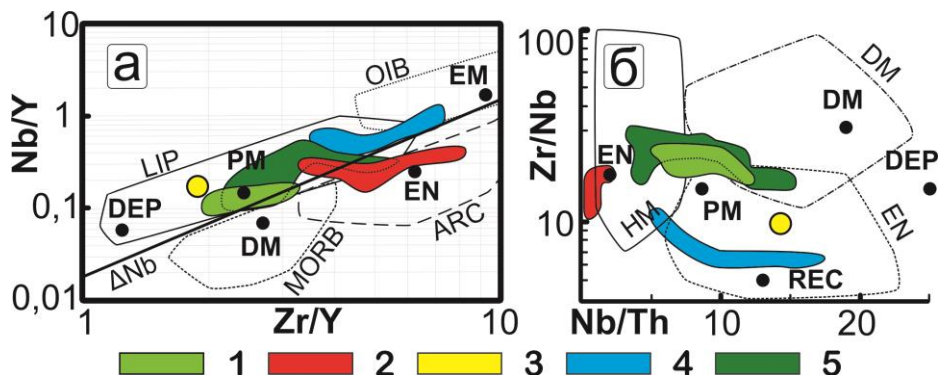


Рис. 5. Диаграммы Nb/Y-Zr/Y(a) (Condie, 2005) и Nb/Th-Zr/Nb(б) (Condie, 2015). Породы: 1 – I этапа; 2 – II этапа; 3 – Породы III этапа района Палой Ламбы; 4 – расслоенные интрузии р-на Остерозера IV этапа; 5 – даек габбро р-на Остерозера IV этапа. Сокращения: PM – примитивная мантия; DM – малоглубинная деплетированная мантия; DEP – глубинная деплетированная мантия; EM – обогащённый мантийный источник; EN – обогащённый компонент; REC – рециклорванный компонент; LIP – большие изверженные провинции; OIB – базальты океанических островов; MORB – базальты срединно-океанических хребтов; ARC – базальты островных дуг.

Согласно систематике Пирса (Рис. 6), базиты I III и IV этапов также являются продуктом плавления глубинного мантийного источника, в то время, как состав пород II этапа в значительной степени несёт следы «субдукционно изменённой литосферной мантии». Это указывает на то, что протолитом пород II этапа была метасоматизированная литосферная мантия.

Состав базитов I и IV этапа района оз. Остер тяготеют к источнику PM и в целом соответствуют составам базальтов древнейших зеленокаменных поясов кратонов Каапваль, Пилбара и западной Гренландии, которые Пирс в своей работе приводит для сравнения. Фигуративные точки состава базитов IV этапа района Палой Ламбы на этой диаграмме лежат правее основного множества точек, что, согласно его модели, может быть следствием низких степеней плавления того же мантийного источника, что и остерских пород этого этапа. Повышенные значения Th/Nb отношения могут быть связаны с присутствием в источнике рециклированного корового компонента, что согласуется с положением точек состава этих пород на диаграммах Конди.

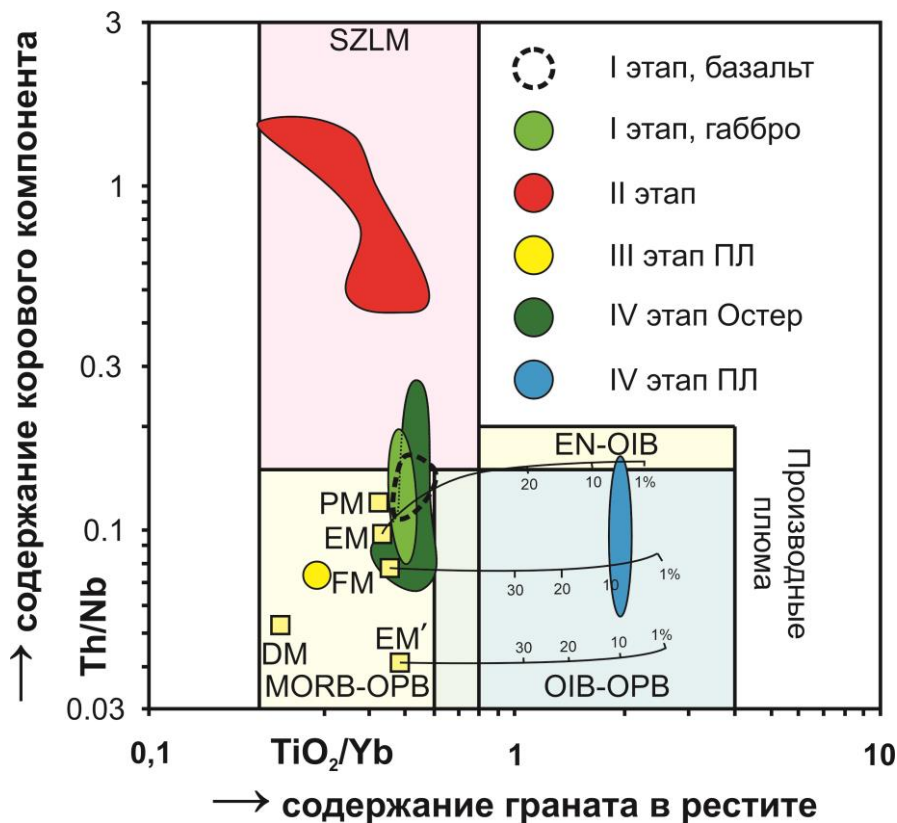


Рис. 6. Сравнение составов пород на диаграмме Th/Nb-TiO₂/Yb (Pearce, 2021). **PM** – примитивная мантия; **DM** – малоглубинная деплетированная мантия; **FM** – глубинная деплетированная мантия; **EM** – FM + рециклированное коровое вещество; **EM'** – FM + рециклированный рестит; **SZLM** – субдукционно модифицированная литосферная мантия; **OPB** – базальты океанических плато; **OIB** – базальты океанических островов; **MORB** – базальты срединно-океанических хребтов. Для источников FM, EM и EM' приведены тренды плавления при давлении 3.5 ГПа.

Химический состав базитов III этапа района Палой Ламбы хоть и соответствует условиям, которые Пирс предъявляет к составам пород, используемых в его дискриминационной диаграмме, в действительности может быть искажен в результате процесса фракционирования расплава, как это было показано для

габбро-анортозитов района оз. Остер. Тем не менее, как положение точки состава этих пород на диаграммах Конди, так и результат моделирования, приведённый в диссертации, предполагает протолитом пород этого этапа астеносферную лерцолитовую мантию.

ВЫВОДЫ

На основе произведённой оценки условий магмообразования для выделенных этапов формирования магматических пород можно сделать выводы как о гетерогенности мантийного вещества, подвергнутого плавлению, так и о различиях в глубине зарождения расплава.

Плавление лерцолитовой мантии в первый, третий и четвёртый этапы происходило в условиях температур и давлений, лежащих выше линии сухого солидуса (Рис. 7) (Green, 2015), причём условия плавления первого и четвёртого этапов сходны. Такие условия характерны для поднимающегося мантийного плюма (Condie, 2001) Условия магмообразования пород II этапа указывают на принципиально иной режим магмогенерации, связанный с плавлением метасоматизированной литосферной мантии в присутствии водного флюида. Р-Т параметры для этих магм находятся в области пересечения геотермы и линии водонасыщенного солидуса. Таким образом, причиной плавления мантии в этот этап могло служить появление водного флюида, а не дополнительный приток тепла.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Геология, петрология и возраст габброанортозитов района озера Остер (Водлозерский домен, Карельская провинция) / Г. А. Кучеровский, Н. А. Арестова // Региональная геология и металлогения. – 2018. – № 73. – С. 24-37.
2. Новые данные о возрасте архейских пород Водлозерского домена (Балтийский щит) и их значение для геодинамических реконструкций / Н.А. Арестова, В.П. Чекулаев, Л.В. Матвеева, Г.А. Кучеровский, Е.Н. Лепёхина, С.А. Сергеев // Доклады РАН. – 2012. – Т. 442. – № 1. – С. 67-73.
3. О соответствии геологических данных и результатов датирования архейских пород U-Pb методом по циркону на примере Карельской провинции Балтийского щита / Н.А. Арестова, В.П. Чекулаев, Г.А. Кучеровский, Ю.С. Егорова, С.Г. Скублов // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 71. – С. 35-52.
4. Формирование архейской коры древнего Водлозерского домена, Балтийский щит / Н. А. Арестова, В. П. Чекулаев, С. Б. Лобач-Жученко, Г. А. Кучеровский // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2015. – Т. 23. – № 2. – С. 3-16.
5. Изменение условий формирования континентальной коры Карельской провинции Балтийского щита при переходе от мезо- к неоархею: результаты геохимических исследований / В. П. Чекулаев, Н. А. Арестова, Ю. С. Егорова, Г. А. Кучеровский // Стратиграфия. Геологическая корреляция – 2018. – № 3. – С. 3-23.

Материалы конференций и совещаний:

1. Геология, петрология и возраст архейских мафитовых даек в районе Палой Ламбы / Г. А. Кучеровский, Н. А. Арестова, Л. В. Матвеева, В.П. Чекулаев, Е.Н. Лепёхина // Современные проблемы магматизма и метаморфизма. Материалы конференции памяти Г.М.Саранчиной и Ф.Ю. Левинсона-Лессинга – СПбГУ, 2012. – Т. 1. – С. С.353-355.
2. Геология, петрология и возраст позднего дайкового комплекса Остерской зеленокаменной структуры (Сегозерско-Ведлозерский зеленокаменный пояс, Водлозерский домен, Карелия) // Сборник

материалов IX Всероссийской школы молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия». Черноголовка, 2018. – С. 49-50.

3. Моделирование условий образования Остерской интрузии габбро-анортозитов (Сегозерско-Ведлозерский зеленокаменный пояс, Водлозерский домен, Карелия) и основные геологические выводы. / Г. А. Кучеровский // Материалы XXIV конференции молодых учёных памяти К.О. Кратца. – Апатиты, 2013. – С. 59-62.

4. Геология, петрология и возраст архейских даек среднего и основного состава в комплексе фундамента в районе Палой Ламбы / Г. А. Кучеровский, Л. В. Матвеева // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. Материалы XXIII молодёжной научной школы-конференции памяти К.О. Кратца. – Петрозаводск, 2012. – С. 39-41.

5. Моделирование условий образования неоархейского дайкового комплекса Остерской структуры (Сегозерско-Ведлозерский зеленокаменный пояс, Водлозерский домен, Карелия) и основные геологические выводы. / Г. А. Кучеровский // Материалы XXV конференции молодых учёных памяти К.О. Кратца. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 113-115.