

На правах рукописи



Филина Мария Игоревна

**ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ ДАЙКИ АГПАИТОВЫХ
СИЕНИТОВ УЧАСТКА МОХНАТЫЕ РОГА
(КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)**

*Специальность 1.6.4 «Минералогия, кристаллография. Геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых»*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) г. Москва.

Научный руководитель: **Когарко Лия Николаевна**, д.г.-м.н., академик РАН, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией геохимии и рудоносности щелочного магматизма, института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), г. Москва

Официальные оппоненты: **Носова Анна Андреевна**, д.г.-м.н., главный научный сотрудник, заведующая лабораторией петрографии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва

Плечов Павел Юрьевич - д.г.-м.н., профессор РАН, директор Минералогического Музея имени А.Е. Ферсмана РАН, профессор кафедры петрологии и вулканологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии Наук, г. Иркутск

Защита состоится «21» мая 2025 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.195.02 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) по адресу: 119991, Москва, ул. Косыгина 19, факс (495) 938-20-54.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГЕОХИ РАН и на сайте www.geokhi.ru в разделе «Диссертации».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета по адресу: 119991, Москва, ул. Косыгина 19, а также на e-mail e.kronrod@geokhi.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.195.02,
кандидат химических наук



Е.В. Кронрод

Введение

Актуальность исследования. Согласно современным представлениям, формирование Кольской щелочно-карбонатитовой провинции (КЩКП), расположенной в северо-восточной части Балтийского щита, в девонское время связано с плюмовым магматизмом (Ernst and Bell 2010; Kogarko et al. 2010). Объем щелочно-ультраосновных расплавов, сформировавших ультраосновные, карбонатитовые и щелочные интрузии, дайковый комплекс и кимберлитовые трубки оценивается в 15000 ± 2.7 тыс. км³ (Арзамасцев и др., 2001). В центральной части Кольского полуострова находятся две крупнейшие в мире щелочные интрузии – Ловозерская и Хибинская, с которыми связаны месторождения стратегических металлов (РЗЭ, Nb, Ta, Ti, Sr, Th, P, Al) (Герасимовский и др., 1966; Когарко, 1977; Арзамасцев, 1994; Kogarko et al., 2002; Kogarko and Nielsen, 2020).

Дайковый магматизм широко развит на территории КЩКП, выделено более 1000 даек, состав которых отвечает разным типам пород: ультраосновным и щелочным лампрофирам, карбонатитам, мелилитовым нефелинитам, щелочным и нефелиновым сиенитам/трахитам, фонолитам и кимберлитам (Арзамасцев и др., 2009; Nosova et al., 2021). Соискателем впервые проведены минералого-геохимические исследования дайки агпаитовых сиенитов участка Мохнатые Рога (Кандалакшский район, Мурманская область), которая является наиболее поздним дифференциатом исходного щелочного расплава. Выявлено обогащение породы Ti, Fe, Sr, Ba, Zr, Nb и РЗЭ. Исследован необычный минеральный состав агпаитовых сиенитов, в котором главными пороодообразующими минералами являются: ортоклаз, энigmatит, Ti-обогащенный эгирин-авгит, минералы группы лампрофиллита, минералы супергруппы амфибола, натролит и феррипирофиллит.

Вторым известным магматическим телом, с близким минеральным и химическим составом является интрузия агпаитовых сиенитов Нива (Arzamastsev et al., 2000), также расположенная на территории КЩКП. В ходе исследования были получены новые данные по геохимии и минералогии интрузии Нива.

Полученные данные по геохимии редких элементов в исследованных агпаитовых сиенитах дайки Мохнатые Рога и интрузии Нива представляют не только научный, но и практический интерес так как позволяют оценить эволюцию щелочных расплавов вплоть до самой поздней стадии дифференциации щелочной магмы, а также механизм накопления редких металлов.

Цель и задачи исследования. Целью работы было исследование минерального и химического, включая изотопный состава агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога, являющихся поздними дифференциатами щелочной магмы. Достижению поставленной цели способствовало решение ряда конкретных задач:

1. Определение минерального и химического состава агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога.
2. Детальная характеристика пороодообразующих и аксессуарных минералов и эволюции их состава в процессе кристаллизации.
3. Исследование минералов группы лампрофиллита и выделение нового минерала фторбаритолампрофиллита.
4. Определение К-Аг состава монофракции минералов группы лампрофиллита и возраста формирования дайки Мохнатые Рога.

Объекты исследования. Дайка агпаитовых сиенитов участка Мохнатые Рога была выбрана для исследований как выделяющаяся по составу на фоне других даек КЩКП. Она была обнаружена в 2010 г. пределах юго-восточного фланга участка Мохнатые Рога (Кандалакшский район, Мурманская область) при проведении комплексных геологоразведочных работ Мурманской геологоразведочной экспедицией (АО «Мурманская ГРЭ») (Мамонтов и др. 2013). С тех пор соискателем начато ее детальное минералого-геохимическое изучение (Акименко и др., 2014; Акименко и др., 2015; Филина

и др., 2017; Filina et al., 2019; Filina et al., 2022). В качестве сравнительного материала были получены новые и привлечены литературные данные (Арзамасцев и др. 1999; Арзамасцева и Пахомовский, 1999; Arzamastsev et al., 2000) по минералогии и геохимии агпаитовых сиенитов интрузии Нива, которая является единственным известным аналогом агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога. Интрузия Нива была открыта в ходе геолого-съёмочных работ Центрально-Кольской поисково-съёмочной экспедицией Роскомнедра в 1996 г.

Фактический материал и методы исследования. Основу диссертационной работы составляет каменный материал, собранный автором в 2011 году при документации керна скважин ЮК-19 (34 образца) и ЮК-24 (45 образцов), вскрывающих дайку Мохнатые Рога. Автором также проведены полевые работы на территории расположения дайки, где было изучено геологическое строение участка Мохнатые Рога (в 2011 г.), и на обнажении интрузии Нива (2014 г.), где было исследовано геологическое строение интрузии и отобраны образцы агпаитовых сиенитов (27 образцов).

Оптическое исследование пород (84 петрографических шлифа) проводилось на поляризационном микроскопе Leica DM2700P. Отбор навесок минералов производится на бинокулярном микроскопе Motic.

Составы минералов (306 анализов) были определены методом электронно-зондового микроанализа на приборах Cameca SX 100 в институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), Jeol JXA-8100 во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ФГБУ ВИМС), и методом сканирующей электронной микроскопии на приборе TESCAN MIRA-3 FEG Oxford в ГЕОХИ РАН.

Инфракрасный спектр поглощения фторбаритолампрофиллита был получен на спектрометре ALPHA FTIR Bruker Optics в федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии РАН (ФИЦ ПХФ и МХ РАН), в научном сотрудничестве с Н.В. Чукановым.

Определение содержания $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ для фторбаритолампрофиллита выполнено методом термогравиметрии с использованием синхронного термического анализатора NETZSCH STA 409C Luxx в ИПХФ РАН (в научном сотрудничестве с Н.В. Чукановым).

Монокристалльный рентгеноструктурный анализ, проведенный в ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, был использован для определения кристаллической структуры фторбаритолампрофиллита (в научном сотрудничестве с С.М. Аксеновым).

Данные о химическом составе пород (петрогенные элементы, 26 проб) были получены методом рентгенофлуоресцентного анализа на рентгенофлуоресцентном спектрометре Axious Advanced PW 4400/04 в ГЕОХИ РАН. Концентрации микроэлементов в изучаемых породах (17 проб) были измерены в институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН) с помощью масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Finnegan Element XR и на квадрупольном масс-спектрометре X-series II Thermo Scientific в ГЕОХИ РАН.

Изотопный состав Rb-Sr и Sm-Nd пород был определен в Центре изотопных исследований (Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского) с использованием термоионизационного масс-спектрометра TRITON TI (в научном сотрудничестве с Б.В. Беляцким). K-Ar изотопный возраст агпаитовых сиенитов получен по минеральному концентрату лампрофиллита в ИГЕМ РАН, на масс-спектрометре ИГ МИ-1201 (в научном сотрудничестве с А.В. Парфеновым и В.А. Лебедевым).

Личный вклад автора состоял в непосредственном участии на всех этапах работы, включая сбор и анализ фондовой и опубликованной литературы по геологическому строению изучаемой территории, участие в полевых работах по изучению геологического строения участка Мохнатые Рога и интрузии Нива, отбор образцов из обнажений и керна

скважин, петрографическое описание шлифов, подготовка проб для химического анализа. Для изотопных исследований, определения оптических показателей, рентгеноструктурного анализа, получения инфракрасного спектра поглощения и измерения термогравиметрии под бинокулярной лупой были отобраны навески минералов группы лампрофиллита. Автор принимал участие в исследовании образцов на электронно-зондовом микроанализаторе и сканирующем микроскопе и обрабатывал полученные результаты. Автор занимался подготовкой статей и тезисов. Автором был изучен новый минерал - фторбаритолампрофиллит и подготовлена заявка в комиссию по новым минералам, номенклатуре и классификации международной минералогической ассоциации (CNMNC IMA).

Научная новизна. В результате проведенных исследований впервые:

1. Изучен химический состав породы, показано, что агпаитовый сиенит дайки Мохнатые Рога характеризуются высокой агпаитностью ($K_a \sim 1.23$) и повышенными содержаниями Ti, Fe, Sr, Ba, Zr, Nb и РЗЭ.

2. Произведено петрографическое описание и определен минеральный состав агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога, показано, что породообразующими минералами являются ортоклаз, энigmatит, Ti-обогащенный эгирин-авгит, минералы группы лампрофиллита, минералы супергруппы амфибола, натролит и феррипирофиллит, второстепенный минерал - астрофиллит и акцессорные нунканбахит, ильменит, рутил, минералы супергруппы апатита с повышенным содержанием РЗЭ, барит, кальцит, пирит, халькопирит, сфалерит.

3. Установлен и описан новый минерал – фторбаритолампрофиллит $(Ba, Sr, K)_2[(Na, Fe^{2+})_3TiF_2][Ti_2(Si_2O_7)_2O_2]$, который был утвержден Международной минералогической ассоциацией (IMA), регистрационный номер IMA № 2016-089.

4. Изучена эволюция химического состава породообразующих минералов групп лампрофиллита (МГЛ) и пироксена из агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога. Показано, что основными трендами изменения состава МГЛ являются: рост содержания бария и калия при уменьшении содержаний стронция, натрия и фтора от ранних к более поздним генерациям. Для пироксенов установлено увеличение содержаний натрия, железа, титана и снижения концентраций магния, кальция и циркония.

5. К-Ar методом определено, что возраст агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога составляет 368 ± 9 млн. лет что совпадает с возрастом палеозойского щелочного магматизма на территории Кольской щелочно-карбонатитовой провинции.

Теоретическая и практическая значимость работы. В работе впервые проведено детальное минералого-геохимическое изучение дайки Мохнатые Рога и показано, что химический и минеральный состав дайки существенно отличается от состава даек, относящихся к поздним дифференциатам КЩКП. Находки подобных проявлений на этой территории в последние десятилетия крайне редки, поэтому детальное исследование современными методами столь необычного проявления щелочного магматизма позволяет более точно расшифровать процессы, происходящие при формировании дифференцированных щелочных комплексов. Было показано, что агпаитовый сиенит дайки обогащен Ti, Fe, Sr, Ba, Zr, Nb и РЗЭ, а формирование этой породы происходило на позднем этапе эволюции щелочного расплава и, по-видимому, является примером постепенного перехода от щелочного расплава к гидротермальному флюиду.

Полученные новые данные представляют не только большой научный интерес, но и практическое значение, так как исследование геохимии агпаитовых сиенитов позволяет оценить эволюцию щелочных расплавов вплоть до самой поздней стадии дифференциации щелочной магмы и механизм накопления редких металлов.

Установлен и описан новый минерал – фторбаритолампрофиллит, который был утвержден Международной минералогической ассоциацией (IMA). Показано, что его

кристаллическая структура аналогична другим моноклинным представителям группы лампрофиллита, относящимся к типу I (2M-политип), а основное отличие фторбаритолампрофиллита от баритолампрофиллита заключается в существенном преобладании F над O и OH в анионной X-позиции. Обнаружение в природных ассоциациях новых минералов, является фундаментальным открытием, которое важно для минералогии, геологии, химии и кристаллографии.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на восьми российских и международных научных конференциях: VIII Международном симпозиуме «Минеральное разнообразие исследование и сохранение», София, Болгария 2015; на XXXII и XXXIII Международных конференциях «Магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов», Апатиты, 2015, Москва, 2016; на второй Европейской Минералогической конференции, Римини, Италия, 2016; на Международной научной конференции, посвященной 300-летию музея Ферсмана РАН, Москва, 2016; на VII Российской молодёжной научно-практической Школе с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, 2017; на XV Ферсмановской научной сессии, Апатиты, 2018; на Международной научной конференции «Щелочной и кимберлитовый магматизм земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов и алмазов», Апатиты, 2023.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ (К1-2) и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, перечня сокращений, рисунков и таблиц, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 170 страниц, включая 60 рисунков, 29 таблиц, а также список литературы из 266 наименований.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю академику РАН д.г.-м.н. Л.Н. Когарко за постоянное внимание и помощь в написании и подготовке работы, сотрудникам лаборатории геохимии и рудоносности щелочного магматизма ГЕОХИ РАН к.г.-м.н. А.М. Асавину, к.г.-м.н. В.А. Зайцеву, к.г.-м.н. Е.С. Сорокиной, И.И. Шубину, за поддержку и ценные замечания. Автор особенно благодарит к.г.-м.н. Н.В. Сорохтину за ценные консультации по генетической минералогии. Автор благодарен за участие в полевых работах ведущему геологу АО «Мурманская ГРЭ» В.П. Мамонтову. Автор благодарен сотрудникам ГЕОХИ РАН В.И. Смирнову, В.А. Туркову за помощь при пробоподготовке. Автор благодарен сотрудникам аналитического отдела ГЕОХИ РАН к.ф.-м.н. Н.Н. Кононковой, к.ф.-м.н. Т.Г. Кузьминой, А.В. Жилкиной за выполненные качественные анализы и сотрудникам лаборатории метеоритики и космохимии ГЕОХИ РАН к.г.-м.н. С.Н. Демидовой, д.г.-м.н. М.А. Ивановой, К.М. Рязанцеву, к.г.-м.н. С.Н. Тепляковой за помощь в выполнении анализов на сканирующем микроскопе. Особо хочется поблагодарить за разностороннюю помощь д.х.н С.М. Аксенова - за выполнение и расшифровку рентгенофазового анализа, участие в полевых работах, анализ и обсуждение материала диссертации. Автор благодарен Б.В. Беляцкому (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского) за определение изотопного состава апатитовых сиенитов, и помощь в интерпретации полученных данных. к.г.-м.н. В.А. Лебедеву и А.В. Парфенову (ИГЕМ РАН) за проведение калий-аргонового датирования пород. Автор глубоко признательна д. ф.-м. н. Н.В. Чуканову (ФИЦ ПХФ и МХ РАН) – за выполнение ИК-спектроскопии, термогравиметрии и помощь в составлении заявки в Международную минералогическую ассоциацию и ценные консультации по минералогии щелочных пород. Автор благодарит старшего

преподавателя кафедры минералогии Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе Т.Ю. Должанской за привитый интерес и любовь к минералогии.

Защищаемые положения:

1. Впервые определен химический состав агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога (Кольский полуостров). Состав дайки характеризуется высокой агпаитностью ($K_a \sim 1.23$) с бариево-стронциевой специализацией, с повышенными содержаниями Ti, Fe, Sr, Ba по сравнению с агпаитовыми сиенитами Ловозерского массива. На классификационной диаграмме $Na_2O + K_2O - SiO_2$ состав попадает в поле конечных продуктов дифференциации ультраосновных лампрофиров Кольской щелочно-карбонатитовой провинции.

2. Главными породообразующими минералами исследованной дайки являются ортоклаз, энigmatит, Ti-обогащенный эгирин-авгит, минералы группы лампрофиллита, минералы супергруппы амфибола, натролит и феррипирофиллит. Эволюция химического состава минералов группы лампрофиллита выражается в увеличении содержаний бария и калия и уменьшении содержаний стронция, натрия и фтора от ранних к более поздним генерациям. Химический состав Ti-обогащенного эгирин-авгита характеризуется высокими содержаниями титана и циркония и эволюционирует в сторону роста эгиринового компонента.

3. Установлен и описан новый минерал - фторбаритолампрофиллит $(Ba, Sr, K)_2[(Na, Fe^{2+})_3TiF_2][Ti_2(Si_2O_7)_2O_2]$, утвержденный Международной минералогической ассоциацией (IMA), регистрационный номер IMA № 2016-089, который в агпаитовых сиенитах имеет магматический генезис.

4. K-Ar возраст агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога составляет 368 ± 9 млн лет, что совпадает с возрастом Кольской щелочно-карбонатитовой провинции.

Геологическое положение дайки участка Мохнатые Рога

Изученная дайка агпаитовых сиенитов находится на юго-западе Кольского полуострова (рис. 1), и располагается в пределах юго-восточного фланга участка Мохнатые Рога. В 2007-2013 гг на этой территории Мурманской Геологоразведочной экспедицией (АО «Мурманская ГРЭ») проводились комплексные геологоразведочные работы на поиски месторождений платины, золота, меди, никеля и сопутствующих компонентов (Мамонтов и др., 2013).

Участок сложен биотитовыми плагиогнейсами, высокоглиноземистыми (кианитовыми) гнейсами, диоритами, гранодиоритами, гранитами и ортоамфиболитами верхнего архея (AR_2), плагиолерцолитами, плагиомикроклиновыми и микроклиновыми гранитами, пикритами и пегматитами относящихся к нижнему протерозою (PR_1). В пределах участка широко развиты дайки палеозойского возраста, которые представлены трахиандезитами, андезибазальтами, щелочными лампрофитами, пикритовыми порфиритами, карбонатитами и агпаитовыми сиенитами северо-восточного простирания. Изучаемая дайка агпаитовых сиенитов была выявлена при документации скважин ЮК-19 (интервал 4.0 - 93.9 м), ЮК-24 (интервал 75.8-146.4 м), расстояние между скважинами составляет 500 м. Дайка оконтурена по данным бурения, методом электроразведки по сети 500×50 м и магниторазведки по сети 250×20 м. По данным бурения и геофизической съемки на уровне земной поверхности дайка в длину простирается более чем на 4 км, на 160 м в ширину, мощность составляет 90 м. Падение пород дайки на север с углом падения $60-90^\circ$, простирание северо-восточное. Вмещающими породами являются биотитовые плагиогнейсы, ортоамфиболиты, диориты позднего архея (AR_2) и плагиолерцолиты нижнепротерозойского возраста (PR_1).

Наиболее близкие по химическому и минеральному составу к исследованной породе являются агпаитовые сиениты интрузии Нива, которая расположена в 35 км к северо-востоку от изученной дайки на южном берегу озера Бабинская Имандра. Интрузия образует

линзовидное тело диаметром 1.5–2 км и выходит на дневную поверхность на площади 200 × 300 м на южном берегу озера. Большую часть интрузии составляют агапитовые сиениты, сопровождающиеся протяженной зоной тонкозернистых ортоклазитов. Вмещающими породами являются Архейские докембрийские амфибол-биотитовые гнейсы Беломорской серии. Также, в радиусе 35-60 км от изучаемой дайки находятся крупные щелочно-ультраосновные массивы с карбонатитами: Ковдор, Африканда, Озерная Варака, Лесная Варака, Кандагуба (рис.1), и дайки различного состава: ультраосновных и щелочных лампрофиров, фойдитов, фонолитов, щелочных пикритов, карбонатитов, тингуаитов и др. (Бородин и др., 1976; Рухлов, 1999; Арзамасцев и др., 2009; Nosova et al., 2021).

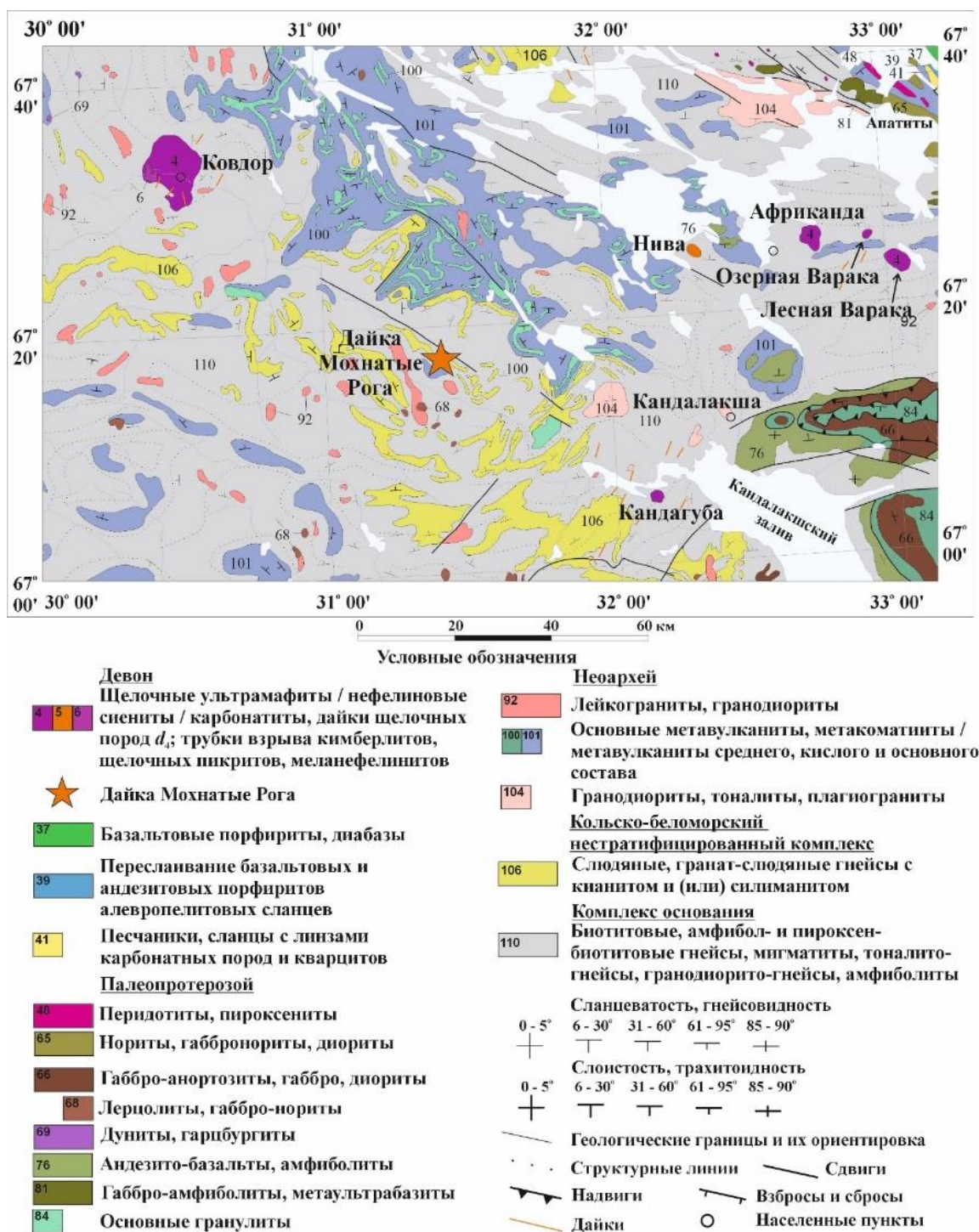


Рис. 1. Фрагмент геологической карты Кольского региона (Mitrofanov et al., 1995) с дополнениями.

Палеозойский дайковый магматизм широко развит на всей территории КЩКП, геофизическими исследованиями показано, что на этой территории распространено преимущественно северо-восточное простирание даек, например, дайки, расположенные около Хибинской, Ковдорской, Контозерской и Ивановской интрузий, в районе Турьего Мыса и Кандалакшского залива (Арзамасцев и др., 2009). Также множество даек простирается с севера на юг. Эти данные свидетельствуют о сильном и широко ориентированном поле растягивающих напряжений с востока на запад во время образования данных даек (Кухаренко и др., 1971; Vartiainen and Paarma, 1979).

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Впервые определен химический состав агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога (Кольский полуостров). Состав дайки характеризуется высокой агпаитностью ($K_a \sim 1.23$) с бариево-стронциевой специализацией, с повышенными содержаниями Ti , Fe , Sr , Ba по сравнению с агпаитовыми сиенитами Ловозерского массива. На классификационной диаграмме $Na_2O+K_2O-SiO_2$ состав попадает в поле конечных продуктов дифференциации ультраосновных лампрофиров Кольской щелочно-карбонатитовой провинции.

Агпаитовые сиениты дайки Мохнатые Рога характеризуется высоким коэффициентом агпаитности ($K_a \sim 1.23$). По сравнению с агпаитовыми нефелиновыми сиенитами Ловозерского и Хибинского массивов, изучаемые породы содержат более чем в три раза больше железа (среднее содержание Fe_2O_3 - 16.62 мас. %) и титана (среднее содержание TiO_2 - 3.33 мас. %), но меньше кремнезема (среднее содержание SiO_2 - 48.64 мас. %), алюминия (среднее содержание Al_2O_3 - 11.51 мас. %) и щелочей (среднее содержание Na_2O - 6.16 мас. % и K_2O - 5.01 мас. %) (табл. 1). Пород дайковой серии в пределах КЩКП, которые были бы аналогами изучаемой дайки агпаитовых сиенитов Мохнатые Рога, на момент исследования не было обнаружено. Наиболее близкие по химическому и минеральному составу к исследованным породам являются агпаитовые сиениты интрузии Нива (Arzamastsev et al., 2000). На диаграмме отношения Na_2O+K_2O к SiO_2 составы агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога и интрузии Нива попадают в поле конечных продуктов дифференциации ультраосновных лампрофиров КЩКП (рис. 2).

Агпаитовые сиениты дайки Мохнатые Рога обогащены Sr , Ba , Zr , Nb и P_2O_5 . Так, среднее содержание бария (6259 г/т) близко к его концентрации в агпаитовом сиените интрузии Нива (6007 г/т) и намного выше чем в Хибинском и Ловозерском массивах (629 и 690 г/т, соответственно) (табл. 1). Среднее содержание стронция (4901 г/т) сопоставимо с таковым в агпаитовом сиените Нивы (5113 г/т), в то время как для Хибинского и Ловозерского массивов концентрации этого элемента значительно ниже и соответственно равны 1398 г/т и 610 г/т. Среднее содержание циркония (2377 г/т) также близко к содержанию в агпаитовом сиените интрузии Нива (1953 г/т), при этом, среднее содержание этого элемента в Ловозерском массиве выше (3480 г/т), тогда как среднее содержание Zr в Хибинском массиве значительно ниже – 531 г/т. Среднее содержание ниобия составляет 634 г/т, что аналогично концентрации в агпаитовом сиените Нивы (567 г/т), а также в Ловозерском массиве (696 г/т), и в два раза выше, чем в Хибинском массиве (226 г/т).

Таблица 1. Содержание главных (мас. %) и редких элементов (г/т) в агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога, интрузии Нива, Ловозерского и Хибинского массивов

	Дайка Мохнатые Рога						Нива	Ловозеро	Хибины
	1	2	3	4	5	6 Ср.	7	8	9
SiO ₂	51.26	48.16	47.59	49.40	46.78	48.64	50.58	53.35	53.22
TiO ₂	3.27	3.49	3.12	3.56	3.21	3.33	3.33	0.91	1.05
Al ₂ O ₃	11.18	11.54	11.56	10.34	12.95	11.51	11.23	17.62	21.26
Fe ₂ O ₃	15.85	16.75	17.59	15.76	17.13	16.62	13.44	5.73	2.59
FeO	—	—	—	—	—	—	—	1.55	1.58
MnO	0.50	0.54	0.55	0.32	0.53	0.49	0.53	0.31	0.18
MgO	1.23	1.06	1.11	1.86	1.06	1.26	2.61	0.95	0.65
CaO	0.84	2.46	2.93	2.00	2.00	2.05	3.14	1.36	1.80
Na ₂ O	5.72	6.13	7.25	4.57	7.12	6.16	7.01	10.11	9.81
K ₂ O	5.95	5.10	4.15	5.94	3.91	5.01	3.32	5.20	6.52
P ₂ O ₅	0.12	0.17	0.08	0.26	0.11	0.15	0.15	0.15	0.29
ППП	3.61	4.00	3.40	5.21	4.24	4.09	4.22	2.72	0.91
Сумма	99.53	99.40	99.33	99.22	99.04	99.30	99.56	99.96	99.86
K _a	1.42	1.35	1.42	1.35	1.23	1.35*	1.34	1.26	1.09
Rb	156	155	139	190	81	144	70.6	230	114.9
Sr	5307	5448	4935	4370	4444	4901	5113	610	1398
Ba	6576	6611	6170	6413	5526	6259	6007	690	629
Zr	2473	2558	2171	2510	2173	2377	1953	3480	531
Hf	37.1	38.7	33.7	40.5	33.1	36.6	34.0	83	13.4
Nb	663	619	601	684	602	634	567	696	226.8
U	17.4	16.8	15.5	14.4	16.2	16.1	14.2	16.1	23.4
Th	35.0	30.3	31.7	35.3	33.1	33.1	30.1	35.0	10.4
Sc	1.55	1.47	1.16	1.08	1.57	1.37	12.9	2.8	8.00
Y	84.2	87.9	81.1	60.5	75.7	77.9	73.4	47.2	53.2
La	215	185	200	226	206	206	178	481	206.8
Ce	351	311	329	375	346	342	300	860	322.8
Pr	33.9	30.5	32.1	34.4	33.4	32.8	28.2	—	39.3
Nd	109	100	103	104	107	105	90.7	298	143.6
Sm	17.8	16.9	17.0	14.3	17.3	16.7	14.7	45.0	25.2
Eu	6.66	6.62	6.37	5.45	6.31	6.28	5.25	11	6.82
Gd	20.8	20.5	20.0	18.0	19.8	19.8	14.9	32.0	16.7
Tb	2.7	2.7	2.6	2.1	2.5	2.5	2.3	6.0	2.19
Dy	15.4	16.1	14.7	11.6	14.1	14.4	13.0	23.0	9.72
Ho	3.10	3.30	2.98	2.36	2.83	2.91	2.60	5.00	1.61
Er	9.23	9.98	8.86	7.34	8.38	8.76	7.76	14.0	3.75
Tm	1.33	1.46	1.27	1.10	1.21	1.27	1.10	0.77	0.47
Yb	8.31	9.29	8.03	7.14	7.61	8.08	6.96	10.0	2.81
Lu	1.06	1.17	1.01	0.91	0.97	1.02	0.92	1.80	0.39
Ce/Yb	42.2	33.5	41.0	52.5	45.5	42.3	43.1	86.0	114.9
Sr/Ba	0.81	0.82	0.80	0.68	0.80	0.78	0.85	0.88	2.22
Nb/Zr	0.27	0.24	0.28	0.27	0.28	0.27	0.29	0.20	0.43
La/Yb	25.9	19.9	24.9	31.7	27.1	25.5	25.6	48.1	73.6
Σ РЗЭ	881	804	829	871	851	847	753	1838	843

1-6 Агпаитовый сиенит дайки Мохнатые Рога (скв. ЮК-19, 1-образец ЮК-19/4.2 м, 2- ЮК-19/26.8 м, 3- ЮК-19/44.0 м, 4- ЮК-19/ 69.4 м, 5- ЮК-19/90 м), 6- среднее, вычисленное для анализов 1-5; 7 - агпаитовый сиенит интрузии Нива, среднее для 6 анализов. Для анализов 1-7 Fe определялось как общее количество Fe₂O₃; 8- средний химический состав для Ловозерского массива (Герасимовский и др., 1966), Y- (Арзамасцев, Митрофанов, 2009); 9 - средний состав Хибинского массива («Хибины Генеральная», Арзамасцев, Митрофанов, 2009), K_a- коэффициент агпаитности. «—» не определено. K_a-коэффициент агпаитности.

* - средний коэффициент агпаитности для 21 анализа агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога составляет 1.23.

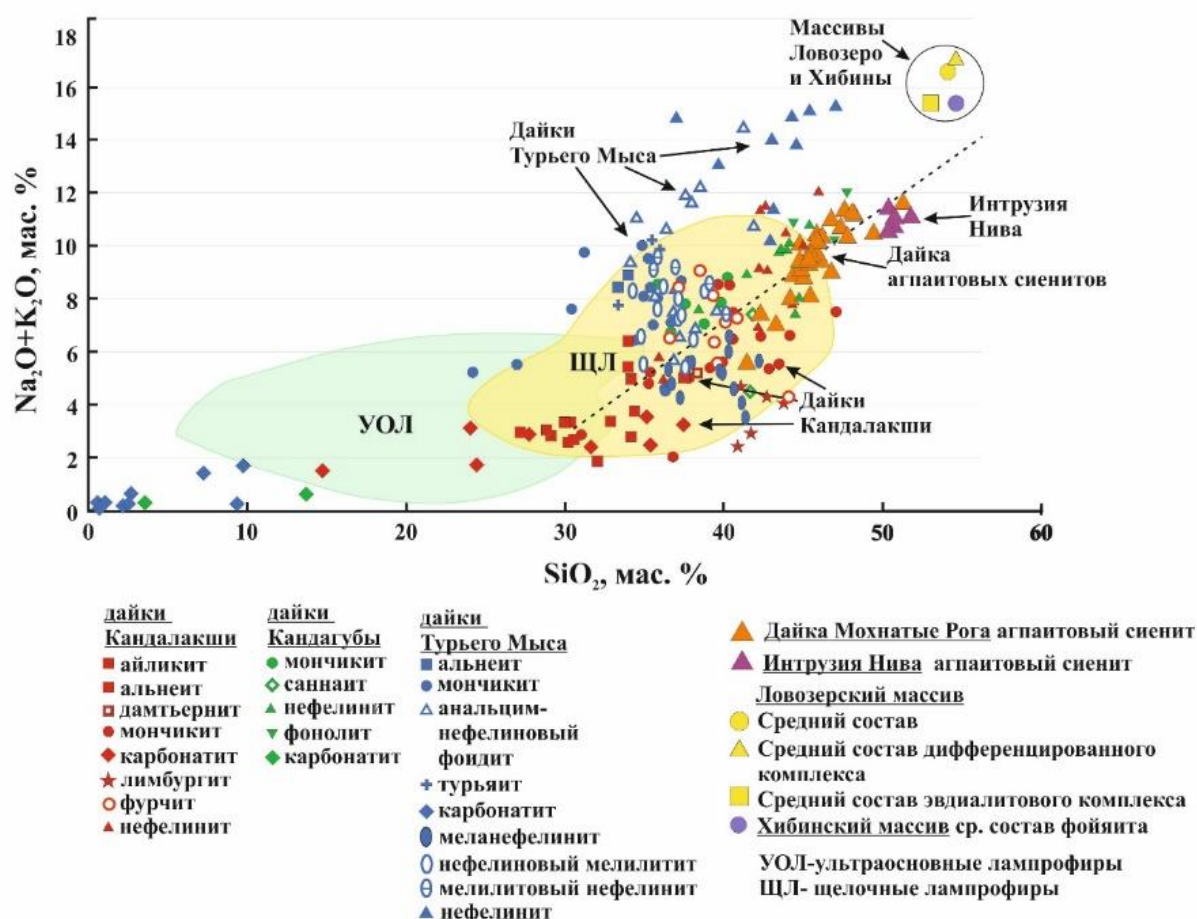


Рис. 2. Составы апатитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога, интрузии Нива, дайковых и апатитовых пород Кольской щелочно-карбонатитовой провинции (Герасимовский и др., 1966; Галахов, 1975; Бородин и др., 1976; Рухлов, 1999; Nosova et al., 2021) на диаграмме отношения $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ к SiO_2 с нанесенными полями ультраосновных (УОЛ) и щелочных лампрофиров (ЩЛ) (Rock, 1991).

На спайдер-диаграммах, нормализованных к хондриту (рис. 3), спектры распределения редкоземельных элементов близки для апатитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога и интрузива Нива. Концентрации легких РЗЭ преобладают над тяжелыми, что характерно для всех щелочных апатитовых пород КЩКП, $\text{Ce}/\text{Yb}_N = 7.20$. Суммы редких земель - $\sum \text{РЗЭ} = 847$ г/т и 753 г/т, исследованной дайки и интрузии Нива ниже по сравнению с Ловозерским массивом. Отсутствие Eu-аномалии на спектре РЗЭ указывает на характер кристаллизационной дифференциации родоначальной щелочной магмы исследованных апатитовых сиенитов без фракционирования плагиоклаза. Таким образом, полученные нами результаты подтверждают ранее предложенную идею (Когарко, 1977; Downes et al., 2005) о значительно недосыщенной кремнеземом первичной магме КЩКП с широким полем кристаллизации мелилита а не плагиоклаза.

На спайдер-диаграммах распределения редких элементов, нормализованных к составу примитивной мантии, также показан аналогичный характер распределения содержаний редких элементов для апатитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога и интрузии Нива (рис. 4). Эти породы характеризуются значительными концентрациями Ba, Nb, Sr и Zr. При этом, повышенное содержание Ba и Sr отличают апатитовые сиениты дайки Мохнатые Рога и интрузии Нива от пород Ловозерского и Хибинского массивов. Значительное накопление Sr, Ba, Zr, Nb и РЗЭ, наблюдаемое в изученных апатитовых сиенитах, отражает длительную кристаллизационную дифференциацию и остаточный характер расплава (Герасимовский и др., 1966; Nosova et al., 2021).

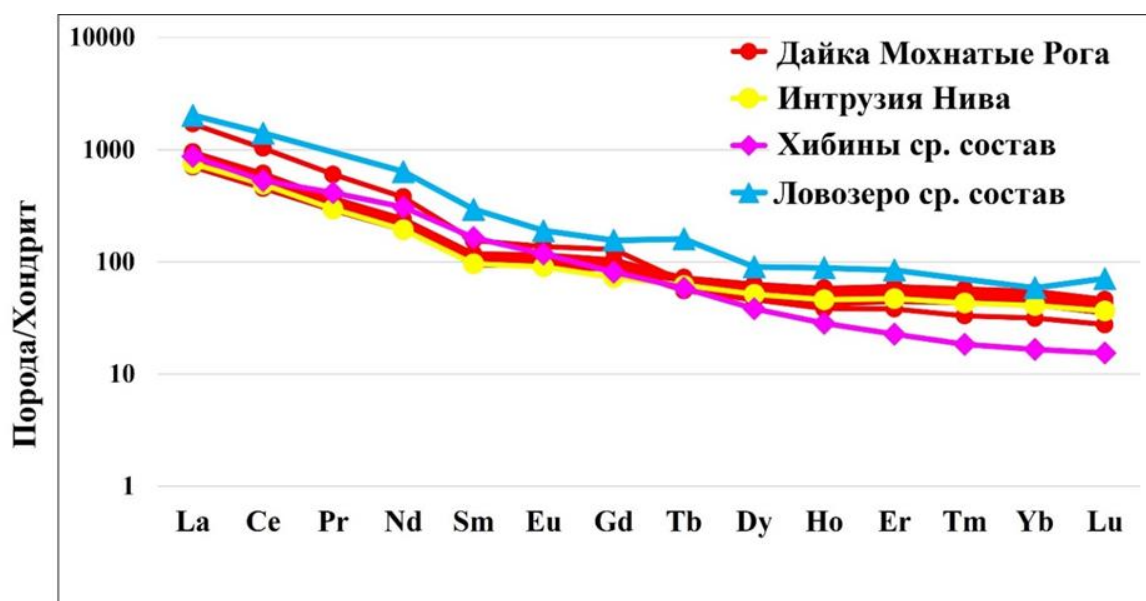


Рис. 3. Распределение РЗЭ агпаитовых сиенитов (табл. 1), нормированное на хондрит (Sun and McDonough, 1989).

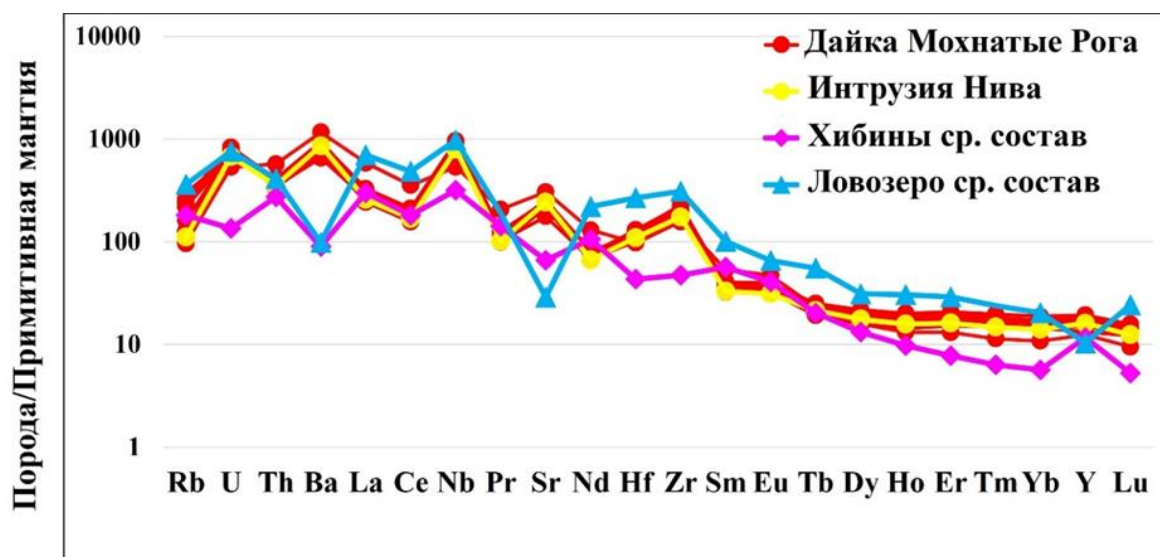


Рис. 4. Распределение редких элементов для агпаитовых сиенитов (табл. 1), нормированное на примитивную мантию (Sun and McDonough, 1989).

2. Главными породообразующими минералами исследованной дайки являются ортоклаз, энigmatит, Ti-обогащенный эгирин-авгит, минералы группы лампрофиллита, минералы супергруппы амфибола, натролит и феррипирофиллит. Эволюция химического состава минералов группы лампрофиллита выражается в увеличении содержаний бария и калия и уменьшении содержаний стронция, натрия и фтора от ранних к более поздним генерациям. Химический состав Ti-обогащенного эгирин-авгита характеризуется высокими содержаниями титана и циркония и эволюционирует в сторону роста эгиринового компонента.

Агпаитовые сиениты дайки Мохнатые Рога полнокристаллические мелкозернистые, серо-зеленого цвета с порфировой структурой и сильно неоднородной основной массой. Главные минералы представлены ортоклазом (25–30 об. %), энigmatитом (5–15 об. %), Ti-обогащенным эгирин-авгитом (10–15 об. %), минералами группы лампрофиллита (МГЛ)

(15–25 об. %), минералами супергруппы амфибола (МСА) (5–10 об. %), эти минералы образуют идиоморфные более крупные (0.5–2 мм) кристаллы. Матрица сложена мелкозернистым ксеноморфным ортоклазом (10–30 об. %), натролитом (30–50 об. %) и феррипирофиллитом (10–25 об. %) (рис. 5). К второстепенным минералам относится астрофиллит (до 5 об. %). К акцессорным минералам относятся: нунканбахит, ильменит, рутил, барит, кальцит, минералы супергруппы апатита с повышенным содержанием РЗЭ (фторапатит, фторкафит, фторстрофит), и минералы группы сульфидов (пирит, халькопирит, сфалерит) (табл. 2). Характерной особенностью породы, является присутствие среди породообразующих минералов, типичных минералов агпаитовой ассоциации – энигматита и минералов группы лампрофиллита, эта особенность резко выделяет изучаемую породу от других разновидностей агпаитовых сиенитов КЩКП (Буссен и Сахаров, 1972; Галахов, 1975; Боруцкий, 1988).

Таблица 2. Минеральный состав агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога

Главные минералы
Ортоклаз $K(AlSi_3O_8)$
Энигматит $Na_2Fe_5TiO_2(Si_6O_{18})$
Ti-обогащенный эгирин-авгит $(Ca,Na)(Fe^{3+},Mg,Fe^{2+})Si_2O_6$
Минералы группы лампрофиллита:
Лампрофиллит $(Na,Mn^{2+})_3(Sr,Na)_2(Ti,Fe^{3+})_3(Si_2O_7)_2O_2(OH,O,F)_2$
Фторлампрофиллит $Na_3(SrNa)Ti_3(Si_2O_7)_2O_2F_2$
Баритолампрофиллит $(Ba,Na)_2(Na,Ti,Fe^{3+})_4Ti_2(Si_2O_7)_2O(OH,F)$
Фторбаритолампрофиллит $(Ba,Sr,K)_2[(Na,Fe^{2+})_3TiF_2][Ti_2(Si_2O_7)_2O_2]$
Минералы супергруппы амфибола:
Калио-арфведсонит $KNa_2Fe^{2+}4Fe^{3+}Si_8O_{22}(OH)_2$
Калио-фтор-катофорит $K(CaNa)(Mg_4Al)(AlSi_7O_{22})F_2$
Натролит $Na_2(Al_2Si_3O_{10}) \cdot 2H_2O$
Феррипирофиллит $Fe^{3+}_2(Si_2O_5)_2(OH)_2$
Второстепенные минералы
Астрофиллит $K_2Na(Fe^{2+},Mn)_7Ti_2(Si_4O_{12})_2O_2(OH)_4F$
Акцессорные минералы
Нунканбахит $BaKNaTi_2(Si_4O_{12})O_2$
Ильменит $FeTiO_3$
Рутил TiO_2
Кальцит $Ca(CO_3)$
Барит $Ba(SO_4)$
Минералы супергруппы апатита:
Фторапатит $Ca_5(PO_4)_3F$
Фторкафит $SrCaCa_3(PO_4)_3F$
Фторстрофит $SrCaSr_3(PO_4)_3F$
Минералы группы сульфидов
Сфалерит ZnS
Пирит FeS_2
Халькопирит $CuFeS_2$

По петрографическим наблюдениям выделено три стадии кристаллизации минералов агпаитовых сиенитов:

– на первой стадии кристаллизовались К-Na полевой шпат, *нефелин*, ильменит, Ti-обогащенный эгирин-авгит I, энигматит, МГЛ I, калио-фтор-катофорит.

– на второй стадии происходило замещение К-Na полевого шпата ортоклазом, кристаллизовались МГЛ II, калио-арфведсонит, астрофиллит, Ti-обогащенный эгирин-авгит II.

– на третьей стадии происходило образование минералов поздней стадии: натролита, феррипирофиллита, МГЛ III.

Исследования высокощелочных магматических комплексов показали, что высокое содержание летучих компонентов в эволюционирующем в сторону увеличения щелочности расплава, приводит к стабилизации богатых летучими элементами фаз и позднему замещению нефелина натролитом (Piotrowski and Edgar, 1970; Когарко, 1977). Этому процессу способствует низкая температура солидуса щелочных расплавов и очень широкий температурный интервал их кристаллизации. Кроме того, экспериментальные исследования (Когарко, 1977; Giehl et al., 2013) показывают высокую растворимость воды и фтора в щелочной магме, что свидетельствует, по всей вероятности, о постепенном переходе щелочного расплава в гидротермальный флюид. Таким образом, предполагается, что изучаемые агпайтовые сиениты были образованы на этом позднем этапе эволюции высокощелочной системы.

Минералы группы лампрофиллита в породе представлены лампрофиллитом, фторлампрофиллитом, баритолампрофиллитом, и фторбаритолампрофиллитом. По химическому составу выделяются две разновидности – высокостронциевая (генерация I) и высокобариевая (генерации II, III). К генерации I относятся зональные по составу, призматические кристаллы, размером 0.5-2 мм, в которых стронций преобладает над барием (рис. 6). Содержание SrO в МГЛ I варьирует от 8.3 до 12.57 мас. %, уменьшаясь к краям кристаллов, при этом растет количество BaO (от 6.71 до 13.23 мас. %). Для генерации МГЛ I также характерно максимальное содержание фтора (3.22 мас. %) (табл. 3).

К генерации МГЛ II относятся ксеноморфные интерстициальные выделения или более мелкие призматические кристаллы, в которых содержание бария преобладает над содержанием стронция. Также как в генерации I наблюдается увеличение содержания бария и уменьшение содержания стронция в краевых частях кристаллов и отмечается уменьшение содержания натрия при увеличении содержания калия. Пределы вариаций содержаний (мас. %) составляют: SrO – от 4.21 до 8.49, BaO – от 11.97 до 16.03. Предельная концентрация фтора составляет 2.28 мас. %, и фиксируется увеличение содержания ниобия по сравнению с МГЛ генерации I – до 1.05 мас. %Nb₂O₅.

Наиболее поздняя генерация МГЛ III, представленная мелкими игольчатыми кристаллами или их сростками, содержит от 5.17 до 5.54 мас. % SrO, и от 13.92 до 16.39 мас. % BaO, концентрация фтора уменьшается от 2.16 до 1.2 мас. %. Как и в генерации МГЛ II, для МГЛ III также установлено уменьшение содержания Na₂O и увеличение содержания K₂O. В этой генерации установлены максимальные содержания Nb₂O₅ – 1.63 мас. % (табл. 3).

Таким образом, установлено, что ранние генерации МГЛ характеризуются широкими вариациями отношения Ba/Sr и стабильно высоким содержанием фтора, который проявляет высокую активность на начальных стадиях кристаллизации расплава. В более поздних генерациях МГЛ увеличивается содержание бария и понижается содержание фтора, а на фоне уменьшения содержания натрия растет концентрация калия. Уменьшение содержания в МГЛ натрия можно объяснить сокристаллизацией последней генерации лампрофиллита с натрий-содержащими натролитом и астрофиллитом. Установленные корреляционные закономерности соответствуют изоморфным замещениям среди A-катионов по принципу $Sr + Na \leftrightarrow Ba + K$.

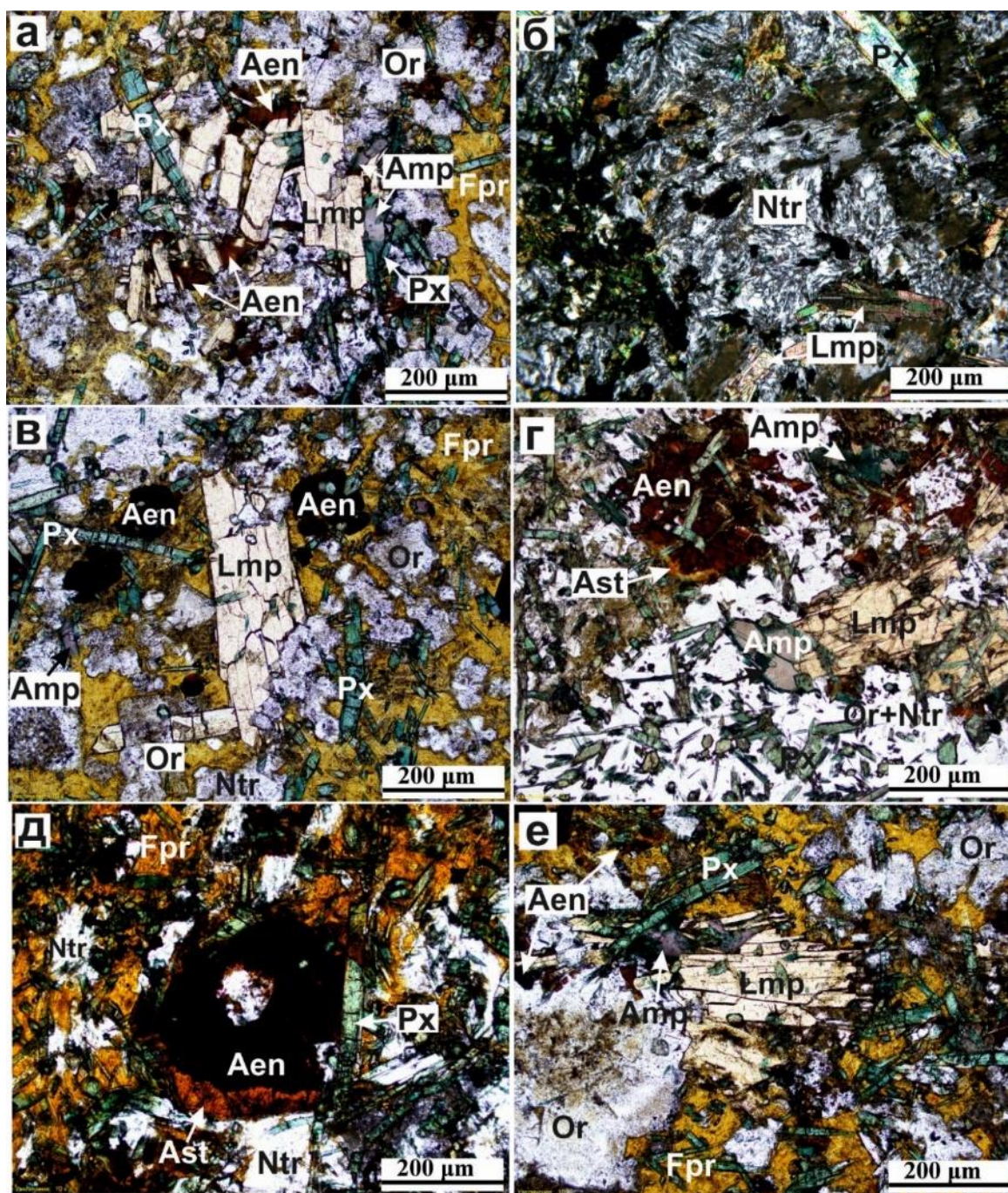


Рис. 5. Взаимоотношение минералов агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога. Срастание призматических или радиальных кристаллов МГЛ (Lmp), окруженных игольчатыми зелеными кристаллами Ti-обогащенного эгирин-авгита (Px) и субидиоморфными зональными розовато-коричневыми кристаллами амфибола (Amp) (а, в, г, е). Коричневые идиоморфные или ксеноморфные кристаллы энigmatита (Aen) (а, в, г, д), по краям замещенные астрофиллитом (Ast) (г, д) с включениями Ti-обогащенного эгирин-авгита. Ортоклаз (Or) с включениями темноцветных минералов (а, в, е). Интерстиции представлены мелкозернистым ксеноморфным натролитом (Ntr), ортоклазом (Or), и желтыми агрегатами феррипирофиллита (Fpr) (а, в, д, е). Теневая структура, по-видимому, нефелина, полностью замещенная натролитом (б). Оптическое изображение в параллельных (а, в-е), и скрещенных николях (б).

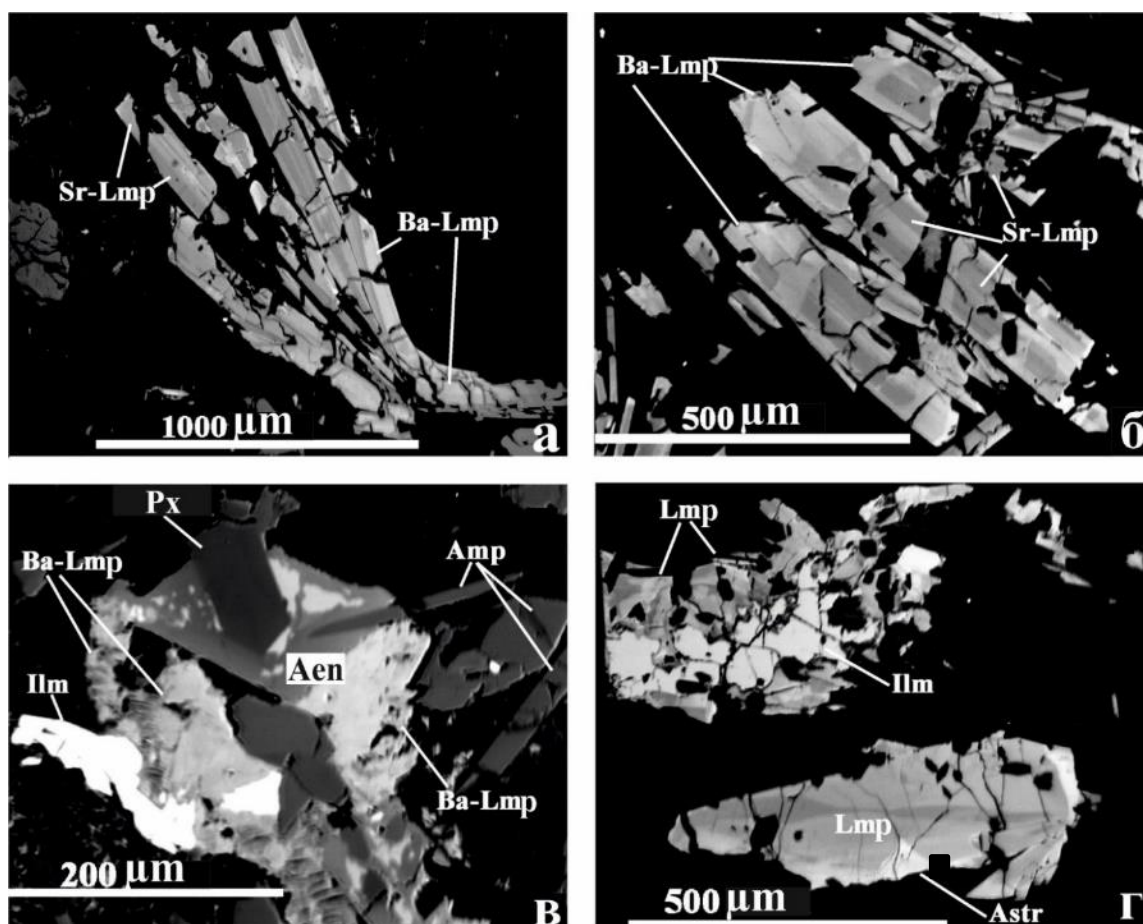


Рис. 6. Изображение в обратно-отраженных электронах зональных кристаллов МГЛ из дайки Мохнатые Рога (Lmp); а, б - первичная ростовая зональность кристаллов МГЛ-I (Sr-Lmp) и МГЛ-II (Ba-Lmp); в - интерстициальные мелкозернистые массы МГЛ-II (Ba-Lmp); г - замещение ильменита (Ilm) МГЛ-I. Px - эгирин-авгит, Amp - амфибол, Aen - энigmatит, Astr - астрофиллит.

Таблица 3. Химический состав (мас. %) минералов группы лампрофиллита из дайки Мохнатые Рога

Компо- нент	Генерация I					Генерация II					Генерация III	
	1 C	2 I	3 C	4 R	5 I	6 C	7 I	8 R	9 C	10 R	11	12
SiO ₂	30.12	29.84	29.96	29.6	28.95	29.48	29.63	29.54	29.78	29.09	27.79	27.46
TiO ₂	29.23	27.63	27.17	27.92	27.37	28	27.96	27.72	27.35	27.29	25.36	25.59
Al ₂ O ₃	0.16	0.18	0.17	0.18	0.21	0.2	0.21	0.22	0.19	0.24	0.36	0.42
FeO	4.45	5.05	5.08	5.23	3.81	5.7	4.54	3.93	4.63	4.26	7.01	5.45
MnO	0.61	0.79	0.78	0.84	0.8	1.15	0.85	0.89	0.79	0.51	0.44	0.35
MgO	1.36	1.36	1.3	1.02	0.79	0.43	0.75	0.71	0.92	0.58	0.34	0.35
CaO	1.05	1.02	1.01	1.04	0.74	1.24	0.87	0.85	0.89	0.73	0.49	0.59
Na ₂ O	10.29	10.08	9.92	9.57	9.57	9.27	9.63	9.39	9.68	9.24	8.47	8.74
K ₂ O	1.40	1.76	1.62	2.04	2.1	2.96	2.27	2.45	1.96	3.07	3.11	2.93
BaO	6.71	9.63	9.76	11.97	13.23	11.97	12.49	15.08	12.97	16.03	13.92	16.39
SrO	12.57	9.32	10.49	8.42	8.3	5.54	7.56	7.34	8.49	4.21	5.54	5.17
ZrO ₂	0.19	0.18	0.14	—	0.42	0.21	0.11	0.13	0.02	0.09	—	0.04
Nb ₂ O ₅	0.14	0.06	0.12	0.15	0.79	0.82	0.19	0.38	0.41	1.05	1.63	1.59
Ta ₂ O ₅	0.03	0.07	—	—	(0.01)	0.15	—	0.04	—	—	0.09	—
ThO ₂	0.24	—	—	0.07	—	0.32	—	0.07	—	(0.01)	0.07	—
UO ₂	0.17	0.19	—	—	—	—	—	—	—	0.59	—	—
F	2.31	3.22	2.3	2.18	2.43	1.38	1.69	2.03	2.28	2.03	1.2	2.16
Сумма	101.03	100.38	99.79	100.23	99.51	98.82	98.76	100.76	100.34	98.93	95.83	97.23
O = F	0.97	1.36	0.97	0.92	1.02	0.58	0.71	0.85	0.96	0.85	0.51	0.91
Сумма*	100.06	99.02	98.82	99.31	98.49	98.24	98.05	99.91	99.38	98.08	95.32	96.32

Примечание. Зоны кристалла: С – центральная, R – краевая, I – промежуточная. Содержания для ThO₂ и Ta₂O₅ равные 0.01 мас. % даны в скобках, т.к. они являются близкими к пределу обнаружения. *- в пересчете на концентрацию фтора. «—» ниже предела обнаружения.

Продолжение таблицы 3. Формульные коэффициенты минералов группы лампрофиллита

Компонент	Генерация I					Генерация II					Генерация III	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	C	I	C	R	I	C	I	R	C	R		
А-десятивершинник												
Sr	0.96	0.72	0.81	0.66	0.66	0.43	0.59	0.57	0.66	0.33	0.46	0.43
Ba	0.35	0.5	0.51	0.63	0.71	0.63	0.66	0.79	0.68	0.86	0.77	0.92
K	0.24	0.3	0.27	0.35	0.37	0.51	0.39	0.42	0.33	0.53	0.56	0.53
Na	0.19	0.25	0.17	0.18	0.05	0.12	0.08	—	0.03	—	—	—
Ca	0.15	0.15	0.14	0.15	0.11	0.18	0.12	0.04	0.13	0.01	0.06	0.02
Сумма	1.89	1.92	1.9	1.97	1.9	1.87	1.84	1.82	1.83	1.73	1.85	1.9
L-пятивершинник												
Ti	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
M1-октаэдр												
Na	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M2-октаэдр												
Na	1.44	1.35	1.38	1.31	1.49	1.3	1.42	1.44	1.47	1.44	1.33	1.42
Mn	0.07	0.09	0.09	0.1	0.09	0.13	0.1	0.1	0.09	0.06	0.05	0.04
Fe	0.49	0.56	0.53	0.59	0.42	0.57	0.48	0.38	0.44	0.4	0.61	0.47
Ca	—	—	—	—	—	—	—	0.08	—	0.1	0.01	0.07
Сумма	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
M3-октаэдр												
Ti	0.90	0.73	0.71	0.8	0.82	0.84	0.82	0.8	0.74	0.8	0.71	0.75
Mg	0.10	0.27	0.26	0.2	0.16	0.09	0.15	0.14	0.18	0.12	0.07	0.07
Fe	—	—	0.03	—	0.02	0.07	0.03	0.06	0.08	0.08	0.22	0.18
Сумма	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Si-тетраэдр												
Si	3.98	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.96	3.94	3.93
Al	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.07
Сумма	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Х-позиция												
F	0.96	1.36	0.96	0.93	1.05	0.59	0.72	0.86	0.96	0.87	0.54	0.98
O	1.04	0.37	0.37	0.67	0.50	0.46	0.48	0.35	0.24	0.05	0.17	0.28
ОН	—	0.27	0.67	0.40	0.45	0.95	0.80	0.79	0.80	1.08	1.29	0.74
Сумма	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Примечание. Составы 1-отвечают лампрофиллиту, 2-4 фторлампрофиллиту, 5,8,9,12 – баритолампрофиллиту, 6,7,10,11 – фторбаритолампрофиллиту. Формульные коэффициенты, рассчитанные на сумму (Si+Al) = 4. Жирным выделены преобладающие элементы в смешаннозаселенных позициях. Значения содержания О и ОН получены исходя из условия электронейтральности.

Сопоставление МГЛ из разных пород щелочных и карбонатитовых массивов Мира показано на треугольной диаграмме K, Sr, Ba (рис. 7). Изученные МГЛ из агапитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога и интрузии Нива образуют широкое поле вариаций составов от стронциевых до бариевых разновидностей, обогащение барием сопровождается ростом содержания калия (Filina et al., 2019). МГЛ из Ловозерского и Хибинского массивов (Зайцев и Когарко, 2002; Азарова, 2004) образуют еще более широкие поля составов, частично дополняющее общую тенденцию – эволюцию от стронциевых к бариевым разновидностям. Составы МГЛ из Ловозерского массива (Зайцев и Когарко, 2002), массива Пилансберг (ЮАР) (Зайцев и Когарко, 2002) и массива Инагли (Labeznik et al., 1998; Chukanov et al., 2004) отличаются более низким содержанием калия.

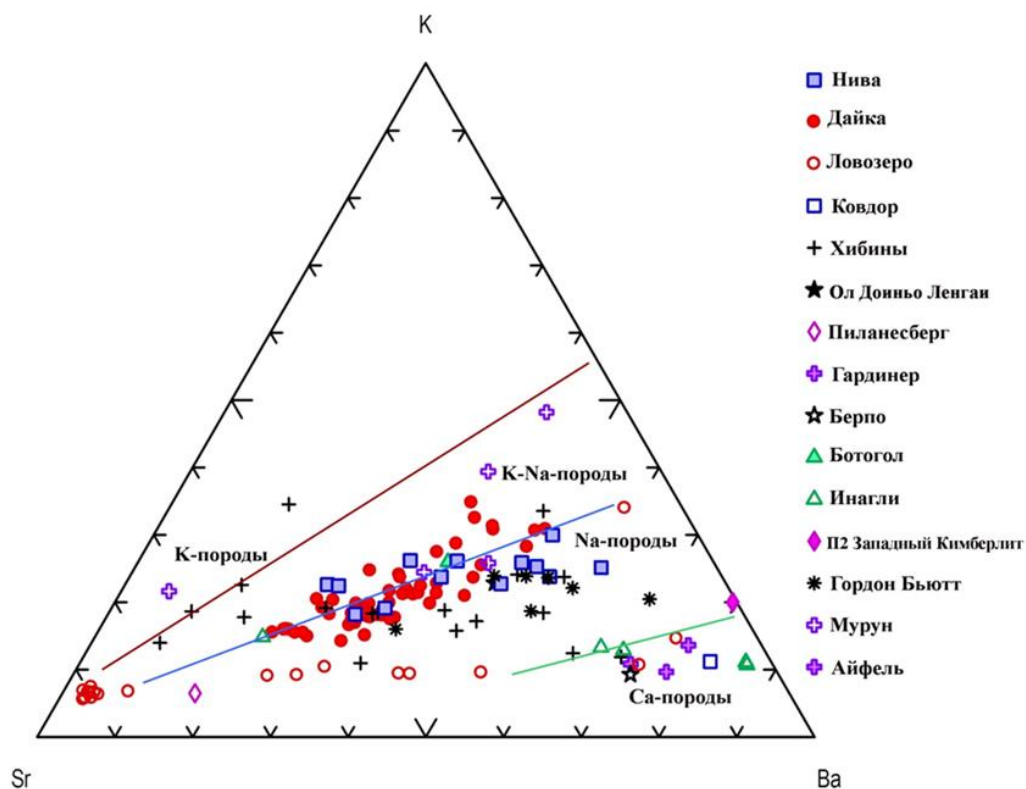


Рис. 7. Соотношение бария, стронция и калия (в формульных единицах) для МГЛ из разных пород щелочных и карбонатитовых массивов Мира, иллюстрирующих основную тенденцию эволюции состава к обогащению бария. Линии разделяют поля состава МГЛ из пород, обогащенных щелочными металлами в разной степени. Дайка – (Дайка Мохнатые Рога), интрузия Нива (Filina et al., 2019), Ловозеро (Зайцев и Когарко, 2002), Хибины (Азарова, 2004), Ковдор (Иванюк и др., 2002), Инагли (Labeznik et al., 1998; Чуканов и др., 2004), Ботогол (Капустин, 1973), Мурун (Конев и др., 1996) – Россия; Гардинер (Гренландия) (Johnsen et al., 1994); Пиланесберг (ЮАР) (Зайцев и Когарко, 2002); Берпо (Chakhmouradian and Mitchell, 1999) и Гордон Бьютт (США) (Chakhmouradian and Mitchell 2002); Ол Доиньо Ленгаи (Танзания) (Dawson, 1998); П2 Западный Кимберлит (Индия) (Kaur and Mitchell, 2013); палеовулкан Айфель (Германия) (Aksenov et al., 2014; Chukanov et al., 2012).

Тi-обогащенный эгирин-авгит в породе встречается как в виде отдельных игольчатых или призматических кристаллов, так в виде скоплений или радиально-лучистых агрегатов (рис. 8). Кристаллы, часто зонально окрашенные со светло-зеленой центральной зоной и травянисто зелеными краями размером 0.5-1.3 мм (рис. 5). Первая генерация эгирин-авгита встречается в виде реликтовых кристаллов в энigmatите (рис. 6 в), более поздняя генерация эгирин-авгита II, развивается по энigmatиту, МСА, МГЛ I и II.

Тi-обогащенный эгирин-авгит зональный по составу – от ядра к периферии увеличивается содержания натрия, железа и титана и уменьшается содержание магния, кальция и циркония. Такая зональность кристаллов определяет главное направление эволюции состава пироксенов - увеличение эгириновой (Na,Fe^{3+}) составляющей и уменьшение диопсидового (Ca,Mg) и геденбергитового (Ca,Fe^{2+}) компонентов (рис. 9, 10). Зональность характерна для пироксенов как ранней, так и поздней генерации. Изучаемые пироксены характеризуются высоким содержанием титана (до 5.99 мас. % TiO_2) и циркония (до 1.26 мас. % ZrO_2) (табл. 4). При пересчете на формульные коэффициенты выявлен избыток натрия, $[\text{Na}-(\text{Fe}^{3+}+\text{Al}_{\text{OCT}})]$, который демонстрирует положительную корреляцию с $[\text{Ti}+\text{Zr}]$, что свидетельствует о присутствии минала Ti-Zr эгирина ($\text{Na}(\text{Ti,Zr})_{0.5}(\text{Mg,Fe}^{2+})_{0.5}\text{Si}_2\text{O}_6$) в изучаемых пироксенах. Наличие этого минала было

показано на примере пироксенов из других щелочных комплексов (Mann et al., 2006; Nielsen, 1979). Однако большинство анализов содержит больше титана чем необходимо для образования Ti-Zr эгирина. Кроме минала Ti-Zr эгирина, титан также может присутствовать в виде нептунитового компонента состава $\text{Na}_2\text{FeTiSi}_4\text{O}_{12}$ (Ferguson, 1977).

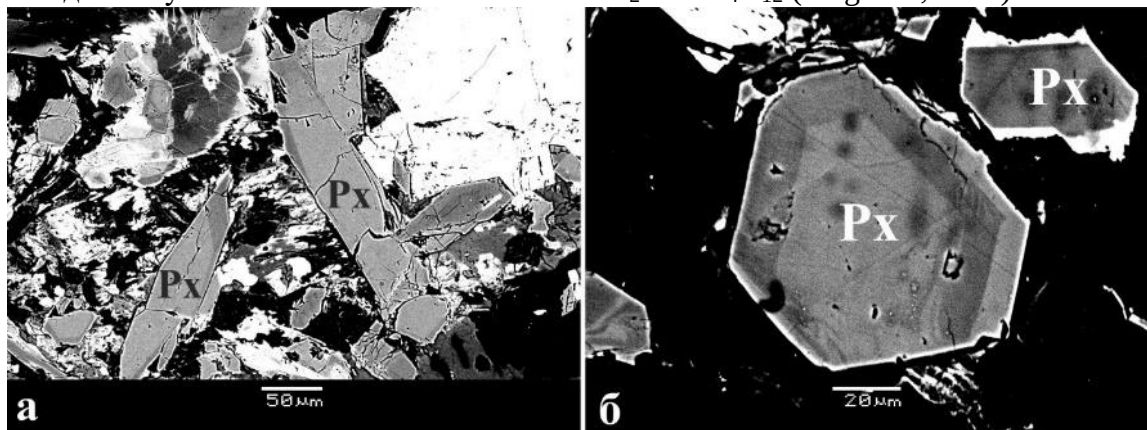


Рис. 8. Игольчатые кристаллы эгирин-авгита (px) (а), и зональный кристалл призматической формы (б) из агапитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога. Изображение в обратно отражённых электронах.

Таблица 4. Химический состав (мас. %) зональных кристаллов Ti-обогащенного эгирин-авгита из дайки Мохнатые Рога.

Компонент	1	2	3	4	5	6	7
	C	R	C	R	C	R	R
SiO ₂	50.57	50.94	51.43	50.83	50.63	50.99	51.7
TiO ₂	3.18	4.67	1.24	3.23	1.83	2.22	5.99
Al ₂ O ₃	0.72	0.89	0.75	0.93	0.9	0.81	0.57
FeO	19.36	19.49	13.35	16.81	14.14	17.13	22.95
MnO	0.39	0.29	0.42	0.41	0.41	0.53	0.23
MgO	4.79	4.06	9.72	6.77	8.91	6.85	1.41
CaO	10.12	8.06	18.85	13.54	17.66	13.96	2.17
Na ₂ O	7.65	9.09	3.27	6.02	3.7	5.68	12.29
K ₂ O	0.01	0.05	0.07	0.07	0.06	0.07	0.05
V ₂ O ₅	0.36	0.41	0.21	0.29	0.13	0.33	0.08
Cr ₂ O ₃	0.02	—	—	—	—	—	—
ZrO ₂	1.26	0.44	0.16	0.45	0.27	0.93	0.45
Сумма	98.44	98.35	99.46	99.31	98.66	99.51	97.94
Формульные коэффициенты, рассчитанные на 6 O							
Si ^{IV}	1.96	1.95	1.94	1.93	1.93	1.95	1.98
Al ^{IV}	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03
Al ^{VI}	—	—	—	—	—	—	0.01
Ti	0.09	0.14	0.04	0.09	0.05	0.06	0.17
Fe ³⁺	0.44	0.47	0.25	0.35	0.26	0.36	0.59
Fe ²⁺	0.19	0.16	0.17	0.18	0.19	0.19	0.15
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Mg	0.28	0.23	0.55	0.38	0.51	0.39	0.08
Zr	0.02	0.01	—	0.01	0.01	0.02	0.01
V	0.01	0.01	0.01	0.01	—	0.01	—
Ca	0.42	0.33	0.76	0.55	0.72	0.57	0.09
Na	0.58	0.68	0.24	0.44	0.27	0.42	0.91
Сумма	4.03	4.03	4.00	3.99	3.99	4.03	4.03
Aeg	43.14	46.31	23.65	34.65	25.75	35.29	58.42
Ti-Zr Aeg	13.48	19.70	—	8.91	1.98	5.88	31.68
Jn	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.96	—
Di	24.51	17.73	54.19	34.65	50.00	36.27	6.93
Hed	14.71	10.84	16.75	17.57	18.32	17.65	—
Сумма	96.81	95.57	95.57	96.78	96.04	97.06	97.03

Примечание. Зоны кристаллов: С – центральная, R - краевая. Aeg – эгирин, Ti-Zr Aeg - Ti-Zr эгирин, Jn – йохансенит, Di – диопсид, Hed – геденбергит. «—» ниже предела обнаружения.

Содержание титана в пироксенах дайки Мохнатые Рога (до 5.99 мас. % TiO_2), близко к содержанию в пироксенах из интрузии Нивы (до 6.05 мас. %) (Филина и др., 2017) и выше чем в пироксенах из Ловозерского массива, которые содержат до 3.68 мас. % TiO_2 (Kogarko et al., 2006), Хибинского массива (до 4.21 мас. % TiO_2 ; Яковенчук и др., 2008) и массива Илимауссак (Гренландия) (до 1.26 мас. % TiO_2 ; Larsen, 1976). Содержание циркония в пироксенах из дайки (до 1.26 мас. % ZrO_2) близко к его содержанию в пироксенах из Ловозерского массива (до 1.35 мас. % ZrO_2 (Kogarko et al., 2006), Хибинского массива – до 1.03 мас. % ZrO_2 (Яковенчук и др., 2008) и массива Илимауссак – до 1.82 мас. % ZrO_2 (Larsen, 1976), и ниже чем в агпаитовых сиенитах массива Гардинер – до 2.9 мас. % ZrO_2 (Nielsen, 1979), но выше чем в агпаитовых сиенитах интрузии Нива - до 0.59 мас. % ZrO_2 (Филина и др., 2017). На тройной диаграмме $\text{Mg-Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} + \text{Mn}$ точки составов пироксенов из дайки Мохнатые Рога и интрузива Нива образуют близкие тренды, которые аналогичны трендам составов пироксенов для Хибинского, Ловозерского массивов и массива Гардинер (рис. 10).

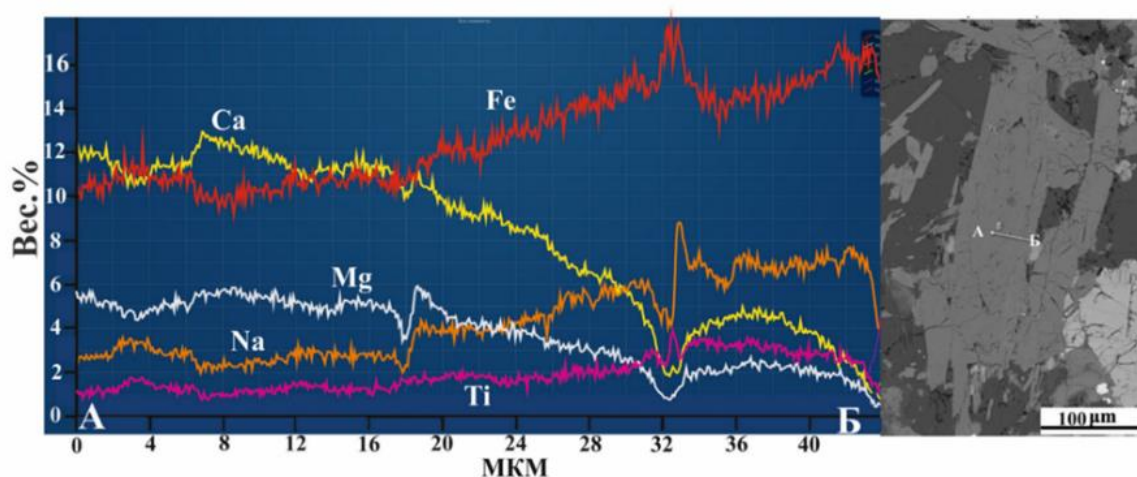


Рис. 9. Распределение элементов в Ti-обогащенном эгирин-авгите по профилю от центра к краю кристалла.

Ортоклаз в агпаитовом сиените образует крупные изометричные кристаллы размером 1-1.5 мм, в которые часто включены зерна темноцветных минералов, встречаются и более мелкие зерна ортоклаза, которыми сложена матрица породы (рис. 5). Состав ортоклаза характеризуется высоким содержанием калия и низким содержанием натрия (0.02–1.14 мас. %) (табл. 5). Первичное происхождение ортоклаза - конечного члена изоморфного ряда альбит – ортоклаз, в агпаитовых сиенитах является маловероятным и предполагается, что ортоклаз был образован по более раннему K-Na полевому шпату. Замещение первичного K-Na полевого шпата ортоклазом на позднемагматическом этапе, было показано на примере ювит-уртитов, нефелин-кальсилитовых сиенитов (рискорритов) и малиньитов Хибинского массива (Боруцкий, 1988; Азарова, 2004).

Энигматит образует пластинчатые кристаллы, размером от 0.3 до 0.8 мм, по краям, а иногда и полностью кристаллы энигматита замещаются астрофиллитом (рис. 5). Состав энигматита варьирует незначительно (табл. 5), зональность внутри кристаллов не выявлена.

Астрофиллит представлен радиально лучистыми агрегатами, размером 0.2–0.6 мм, и характеризуется высоким содержанием железа, содержание FeO достигает 34.34 мас. %, и

содержания MgO варьирует в пределах 1.93-2.14 (мас. %), MnO – 1.17-1.19 (мас. %) (табл. 5).

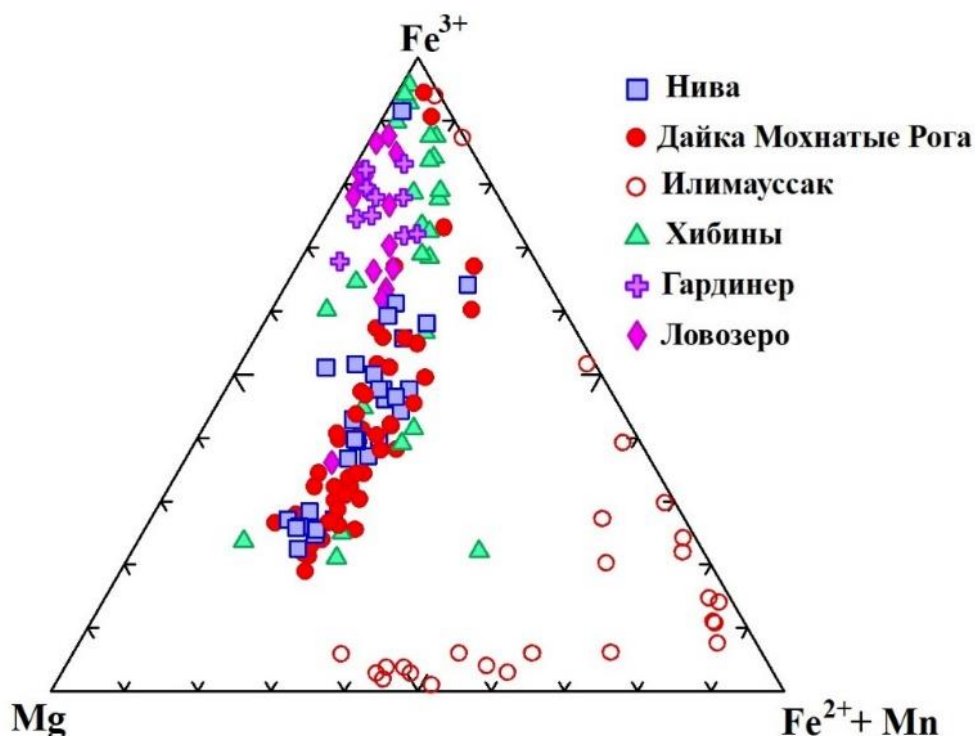


Рис. 10. Составы пироксенов из дайки Мохнатые Рога и других щелочных массивов (Larsen, 1976; Nielsen, 1979; Marks and Markl, 2001; Kogarko et al., 2006; Яковенчук и др., 2008), нанесенные на трейную диаграмму $\text{Mg} - \text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} + \text{Mn}$.

Натролит образует мелкозернистую массу в интерстиции между зернами темноцветных минералов и ортоклазом, в виде мелкозернистых, пластинчатых выделений неправильной формы, размером от 0.2-0.5 мм, также встречаются теньевые структуры, по-видимому, нефелина, полностью замещенные натролитом (рис. 5б). В составе натролита отмечается примесь железа (табл. 5). Замещение натролитом нефелина на поздней стадии образования широко также распространено в породах Ловозерского и Хибинского массивов (Власов и др., 1959; Ловская, 2011).

Феррипирофиллит – редкий минерал, впервые был описан в гидротермальных жилах гематитового месторождения Штрассеншахт, Германия, и свинцово-медного рудопроявления Тулагай в Казахстане (Чухров и др., 1979). В агпаитовых сиенитах образует мелко чешуйчатые агрегаты, размером до 0.2 мм. Состав феррипирофиллита показывает дефицит суммы (табл. 5), по-видимому, связанный с наличием воды в структуре, содержание FeO достигает 28.21 мас. % (табл. 4).

Минералы супергруппа амфибола (МСА) образуют удлиненные крупные (0.5-1.2 мм) зональные по составу кристаллы буровато-коричневого цвета с зелеными краями (рис. 5). МСА по составу соответствуют калио-фтор-катофориту, калио-магнезио-фтор-арфведсониту, титанистому калио-магнезио-фтор-арфведсониту, калио-арфведсониту, титанистому калио-арфведсониту, титанистому калио-фтор-арфведсониту (Hawthorne et al., 2012). Исследованные МСА характеризуются высоким содержанием K_2O (до 4.49 мас. %, что позволяет ему преобладать над Na в А позиции (табл. 6). Характерной особенностью МСА также является высокое содержание титана (до 4.14 мас. %) и фтора (до 3.54 мас. %). Амфиболы зональные: от центра к краю увеличивается содержание калия и железа и уменьшается количество магния, кальция, титана и фтора. Содержание Na_2O колеблется от

6.36 до 7.31 мас. %, содержание CaO от 0.21 до 3.05 мас. %, содержание FeO от 14.12 до 31.97 мас. %, содержание MgO от 1.10 до 12.40 мас. %, содержание марганца варьирует незначительно: 0.42-0.59 мас. % (табл. 6).

Акцессорные минералы характеризуются повышенными содержаниями РЗЭ и ниобия, так **фторстрофит** содержит до 6.77 мас. % La_2O_3 и до 1.18 мас.% Ce_2O_3 . **Нунканбахит** содержит до 3.51 мас.% Nb_2O_5 , **рутил** содержит до 2.65 мас.% Nb_2O_5 (табл. 5).

Таблица 5. Химический состав (мас. %) главных и акцессорные минералов дайки Мохнатые Рога

Компо- нент	Ортоклаз		Энигматит		Астрофиллит		Натролит		Феррипиро- филлит		Акцессорные минералы		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	63.63	65.37	41.18	41.74	38.61	38.15	47.85	47.90	53.87	48.89	—	41.22	2.25
TiO ₂	0.04	—	10.50	9.85	9.57	8.85	—	—	0.28	0.34	—	23.69	91.44
Al ₂ O ₃	19.16	18.36	0.57	0.52	0.80	0.85	27.44	27.46	4.23	3.16	—	0.21	0.61
FeO	0.11	0.01	37.65	38.16	33.79	34.34	0.27	0.26	23.04	28.21	0.46	0.80	0.94
MnO	0.06	0.01	1.29	1.46	1.19	1.17	—	—	0.35	0.34	—	0.08	—
MgO	0.03	—	2.40	1.96	2.14	1.93	—	—	0.80	1.67	—	0.05	—
CaO	—	—	0.21	0.07	0.15	0.21	—	—	0.82	0.49	7.40	0.31	0.21
Na ₂ O	1.14	0.02	7.59	7.57	2.93	2.75	17.42	17.51	0.07	0.13	1.35	2.43	0.42
K ₂ O	15.65	16.84	0.01	—	7.28	6.74	0.07	0.07	2.10	1.80	—	7.17	0.05
SrO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	47.24	—	—
BaO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.79	16.27	—
La ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.77	—	—
Ce ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.18	—	—
UO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.77	—
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29.14	—	—
ZrO ₂	—	—	—	0.04	—	0.13	—	—	0.03	0.03	—	—	0.15
Nb ₂ O ₅	—	—	—	0.08	0.06	0.07	—	—	0.03	—	—	3.51	2.65
F	—	—	0.11	0.14	—	—	—	—	0.09	0.40	3.34	1.89	—
Сумма	99.82	100.61	101.51	101.59	96.52	95.19	93.05	93.20	85.71	85.46	99.67	98.64	98.72
O=F	—	—	0.05	0.06	—	—	—	—	0.04	0.17	1.41	0.80	—
Сумма*	—	—	101.46	101.53	—	—	—	—	85.67	85.29	98.26	97.84	—
Формульные коэффициенты													
Si	2.95	3.01	5.75	5.83	7.54	7.57	2.97	2.96	3.88	3.67	—	4.03	0.03
Ti	—	—	1.10	1.04	1.41	1.32	—	—	0.02	0.02	—	1.74	0.93
Al	1.05	0.99	0.09	0.09	0.18	0.20	2.00	2.00	0.36	0.28	—	0.02	0.01
Fe	—	—	4.40	4.46	5.52	5.70	0.01	0.01	1.39	1.77	0.05	0.07	0.01
Mn	—	—	0.15	0.17	0.20	0.20	—	—	0.02	0.02	—	0.01	—
Mg	—	—	0.50	0.41	0.62	0.57	—	—	0.09	0.19	—	0.01	—
Ca	—	—	0.03	0.01	0.03	0.04	—	—	0.06	0.04	0.94	0.03	—
Na	0.10	—	2.05	2.05	1.11	1.06	2.09	2.10	0.01	0.09	0.31	0.46	—
K	0.93	0.99	—	—	1.81	1.71	0.01	0.01	0.19	0.17	—	0.89	0.01
Sr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.23	—	—
Ba	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.13	0.62	—
Nb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08	0.02
La	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.29	—	—
Ce	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.05	—	—
P	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.91	—	—
F	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.25	0.58	—

Примечание. 11 - фторстрофит, 12 - нунканбахит, 13 - рутил. «—» – ниже предела обнаружения. *- в пересчете на концентрацию фтора. Формульные коэффициенты, рассчитаны на 8 О для ортоклаза; на 20 О для энигматита; на 26 О для астрофиллита; на 10 О для натролита и феррипирофиллита; на 5 катионов в позиции М1 и М2 для фторстрофита; на 14 О для нунканбахита; на 2 О для рутила.

Таблица 6. Химический состав (мас. %) зональных кристаллов минералов супергруппы амфибола из дайки Мохнатые Рога

Компонент	1	2	3	4	5	6	7
	1C	2C	2R	3C	4C	4R	5R
SiO ₂	49.86	52.05	48.38	52.29	51.71	51.41	49.46
TiO ₂	3.02	3.68	3.00	3.96	4.14	2.96	2.88
Al ₂ O ₃	0.75	1.13	1.25	1.23	1.43	0.92	0.32
FeO	14.19	14.12	30.24	17.05	16.39	21.32	31.97
MnO	0.53	0.50	0.42	0.59	0.51	0.5	0.47
MgO	12.4	12.34	2.17	11.39	11.59	8.03	1.10
CaO	3.05	2.05	0.24	1.97	2.43	1.61	0.21
Na ₂ O	6.36	7.31	7.2	6.98	6.74	6.63	6.52
K ₂ O	3.60	3.44	4.33	3.42	3.34	3.79	4.49
ZrO ₂	0.85	0.59	0.01	0.47	0.14	0.19	—
SrO	0.57	0.44	0.01	—	—	—	—
F	3.54	3.14	0.26	1.77	3.40	2.13	—
Сумма	98.72	100.79	97.51	101.12	101.82	99.49	97.42
O=F	1.49	1.32	0.11	0.75	1.43	0.90	—
Сумма*	97.23	99.47	97.40	100.37	100.39	98.59	—
Формульные коэффициенты рассчитаны на сумму анионов (ОН, F, Cl, O) равную 24							
Na	0.43	0.47	0.26	0.39	0.34	0.24	0.07
K	0.70	0.65	0.88	0.64	0.63	0.74	0.92
Σ _A	1.13	1.13	1.14	1.03	0.97	0.98	1.00
Mn ²⁺	—	—	—	0.07	0.02	0.01	—
Fe ²⁺	—	—	—	0.01	—	—	—
Ca	0.50	0.33	0.04	0.31	0.39	0.26	0.04
Sr	0.05	0.04	—	—	—	—	—
Na	1.45	1.64	1.96	1.61	1.59	1.72	1.96
Σ _B	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Ti	0.10	0.36	0.28	0.36	0.36	0.34	0.35
Zr	0.06	0.04	—	0.03	0.01	0.01	—
Al	—	—	—	—	—	0.03	0.02
Fe ³⁺	0.40	—	0.77	—	0.12	0.13	0.28
Mn ²⁺	0.07	0.06	0.06	—	0.04	0.05	0.06
Fe ²⁺	1.41	1.76	3.24	2.10	1.91	2.60	4.02
Mg	2.82	2.74	0.51	2.50	2.56	1.83	0.26
Σоктаэдр	4.87	4.96	4.86	5.00	5.00	5.00	5.00
Si	7.62	7.75	7.68	7.71	7.65	7.87	7.96
Al	0.14	0.20	0.23	0.21	0.25	0.13	0.04
Ti	0.25	0.06	0.08	0.08	0.10	—	—
Σтетраэдр	8	8	8	8	8	8	8
O	22	22	22	22	22	22	22
ОН	0.29	0.52	1.87	1.18	0.41	0.97	2.00
F	1.71	1.48	0.13	0.83	1.59	1.03	—
Σ _w	2	2	2	2	2	2	2

Примечание. Зоны кристаллов: С – центральная. R – краевая. «—» – ниже предела обнаружения. Значения содержания ОН получены исходя из условия электронейтральности. *- в пересчете на концентрацию фтора. Цифра в каждой зоне показывает индивидуальный кристалл. Составы 1 соответствует - калио-фтор-катофориту, 2,5 - титанистому калио-магнезио-фтор-арфведсониту, 3 - калио-арфведсониту, 4 калио-магнезио-фтор-арфведсониту, 6 - титанистому калио-фтор-арфведсониту, 7 - титанистому калио-арфведсониту.

3. Установлен и описан новый минерал - фторбаритолампрофиллит (Ba,Sr,K)₂[(Na,Fe²⁺)₃TiF₂][Ti₂(Si₂O₇)₂O₂], утвержденный Международной минералогической ассоциацией (IMA), регистрационный номер IMA № 2016-089, который в агпаитовых сиенитах имеет магматический генезис.

В ходе детального исследования химического состава и кристаллической структуры минералов группы лампрофиллита из агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога и интрузии Нива автором был установлен новый минерал **фторбаритолампрофиллит** с

общей формулой $(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{K})_2[(\text{Na}, \text{Fe}^{2+})_3\text{TiF}_2][\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{O}_2]$ (Filina et al., 2019) который в 2016 г. был утвержден комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (CNMNC IMA), регистрационный номер IMA № 2016-089.

Фторбаритолампрофиллит является F-доминантным аналогом баритолампрофиллита и Ba-доминантным аналогом фторлампрофиллита. Содержание бария во фторбаритолампрофиллите из дайки Мохнатые Рога достигает 16.39 мас. % BaO, из интрузии Нива – 19.99 мас. % BaO, содержание фтора достигает 2.43 мас. % F и 2.74 мас. % F (табл. 7).

Фторбаритолампрофиллит в породе образует призматические кристаллы, размером до $0.2 \times 0.5 \times 3.5$ мм или их радиально лучистые сростки (рис. 11). Цвет минерала меняется от светло до темно желтого, твердость по шкале Мооса – 2.5. Минерал хрупкий, имеет совершенную спайность по {100}. Плотность, рассчитанная по эмпирической формуле, составляет 3.662 г/см^3 . Минерал оптически двухосный (+), $\alpha = 1.738$ (3), $\beta = 1.745$ (4), $\gamma = 1.777$ (4), $2V$ (изм.) = $55(5)^\circ$, $2V$ (рассч.) = 51° . Дисперсия очень сильная: $r > v$. Оси X и Z лежат в плоскости (100) под углом, близким к 90° . Фторбаритолампрофиллит обладает высоким положительным рельефом, величина двойного лучепреломления достигает 0.03, угасание косое под углом $c:N_g$ до 13° , удлинение положительное, плеохроизм от светло-желтого по N_p до золотисто-коричневого по N_g ; схема абсорбции прямая ($N_g > N_p$).

Уточненная кристаллическая химическая формула фторбаритолампрофиллита ($Z = 2$): ${}^A(\text{Ba}_{0.43}\text{K}_{0.23}\text{Sr}_{0.22}\text{Na}_{0.12})_2[{}^{M1}\text{Na}{}^{M2}(\text{Na}_{0.69}\text{Fe}^{2+}_{0.235}\text{Ca}_{0.045}\text{Mn}_{0.03})_2{}^{M3}(\text{Ti}_{0.87}\text{Mg}_{0.09}\text{Fe}^{2+}_{0.04})^X(\text{F}_{0.52}\text{O}_{0.37}(\text{OH})_{0.11})_2][(\text{Ti}_{0.96}\text{Nb}_{0.04})_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{O}_2]$, где квадратными скобками выделены ключевые фрагменты структуры – слой из реберносвязанных $M(1-3)$ -октаэдров и гетерополиэдрическая сетка из L -пятивершинников и Si-диортогрупп.

Кристаллическая структура фторбаритолампрофиллита аналогична другим моноклинным представителям группы лампрофиллита относящимся к типу I ($2M$ -политип) (Rastsvetaeva et al., 2016; Krivovichev et al., 2003). В структуре фторбаритолампрофиллита наибольший M1-октаэдр со средним расстоянием $\langle M1-O \rangle = 2.431 \text{ \AA}$ полностью заселен натрием. Натрий (0.69 атома) статистически доминирует также в M2-позиции ($\langle M2-O \rangle = 2.431 \text{ \AA}$). Его недостаток компенсируется железом (0.235 атома) и марганцем (0.03 атома). Как и в структуре баритолампрофиллита, в наименьшем M3-октаэдре ($\langle M3-O \rangle = 1.995 \text{ \AA}$) преобладает Ti (0.87 атома) с примесью Mg (0.09 атома) и Fe (0.04 атома). Основное отличие фторбаритолампрофиллита от баритолампрофиллита заключается в существенном преобладании F над O и OH в анионной X-позиции, расположенной на стыке трех октаэдров (двух M2-октаэдров и одного M3-октаэдра).

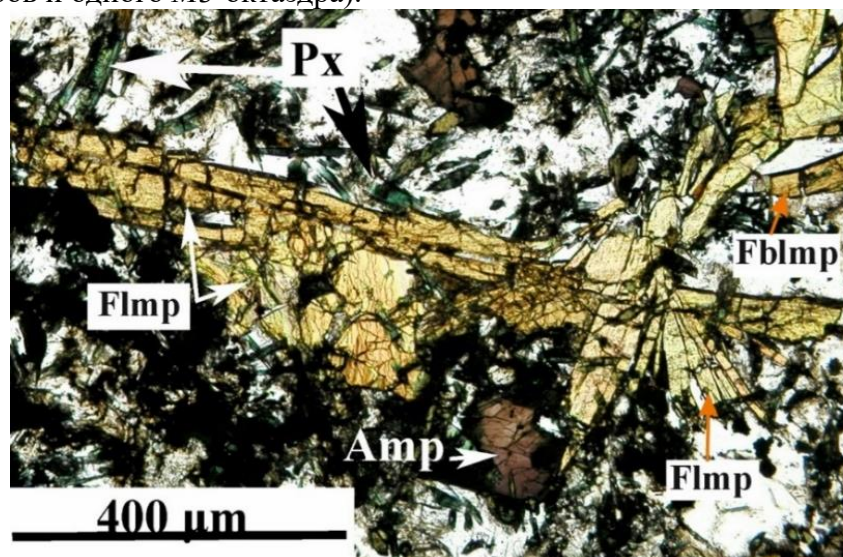


Рис. 11. Фторбаритолампрофиллит (Fblmp) в ассоциации с радиально-лучистым фторлампрофиллитом (Flmp), интрузия Нива, образец Н-1-1.

Таблица 7. Химический состав фторбаритолампрофиллита.

Компонент	Дайка Мохнатые Рога	Инtruзия Нива
SiO ₂	28.93 (27.46–29.78)	29.35 (28.56–30.33)
TiO ₂	27.01 (25.59–27.72)	27.31 (26.44–27.72)
Al ₂ O ₃	0.26 (0.19–0.42)	0.08 (0.06–0.11)
FeO	4.46 (3.81–5.45)	4.44 (4.12–4.98)
MnO	0.71 (0.35–0.89)	0.50 (0.30–0.76)
MgO	0.69 (0.35–0.92)	0.43 (0.24–0.66)
CaO	0.77 (0.59–0.89)	0.64 (0.50–0.79)
Na ₂ O	9.35 (8.74–9.68)	10.01 (9.04–10.84)
K ₂ O	2.36 (1.96–2.93)	2.65 (2.38–3.20)
BaO	14.42 (12.97–16.39)	16.23 (12.85–19.99)
SrO	7.33 (5.17–8.49)	5.59 (3.34–8.08)
ZrO ₂	0.15 (0.02–0.42)	0.22 (0.11–0.51)
Nb ₂ O ₅	0.79 (0.41–1.59)	0.91 (0.14–1.12)
Ta ₂ O ₅	–	0.15 (0–0.36)
F	2.23 (2.03–2.43)	2.41 (2.10–2.74)
H ₂ O	–	0.26*
Сумма	99.46	101.18
O=F	0.94	1.01
**Сумма	98.52	100.17

Примечание. В таблице указаны средние значения содержаний компонентов для 4 анализов фторбаритолампрофиллита из дайки Мохнатые Рога и 5 анализов из инtruзии Нивы, диапазон указан в скобках. * - по данным термогравиметрии, ** - в пересчете на концентрацию фтора.

4. K–Ar возраст агпаитовых сиенитов дайки составляет 368 ± 9 млн лет, что совпадает с возрастом Кольской щелочно-карбонатитовой провинции.

K–Ar возраст агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога, определенный при изучении монофракции МГЛ в качестве геохронометра, составил 368 ± 9 млн лет (табл. 8), что совпадает с возрастом палеозойского щелочного магматизма КЩКП ($368\text{--}385$ млн лет) (Kramm et. al, 1993; Kramm and Kogarko, 1994; Арзамасцев, 1998; Арзамасцев и др., 2001). В частности, полученный возраст близок к возрастам агпаитовых сиенитов инtruзии Нива – 373 ± 10 млн лет (K–Ar метод, табл. 8, данные автора), 379 ± 21 млн лет (Rb–Sr метод), 383 ± 58 млн лет (Sm–Nd метод) (Arzamastsev et al., 2000), Ловозерского массива – 370.4 ± 6.7 млн лет (Kramm and Kogarko, 1994) и Хибинского массива – 366.6 ± 19.8 млн лет (Kramm and Kogarko, 1994).

Таблица 8. Результаты K–Ar датирования МГЛ из дайки Мохнатые Рога и инtruзии Нива

№	Образец	Объект	Калий, %	⁴⁰ Ar _{рад} (нг/г) ± σ	⁴⁰ Ar _{возд} , % в образце	Возраст, млн лет ± 2 σ
1	ЮК-19л	Дайка Мохнатые Рога	1.61 ± 0.02	45.54 ± 0.14	5.98	368 ± 9
2	Нива-Лам	инtruзия Нива	1.57 ± 0.02	45.11 ± 0.14	5.15	373 ± 10

Заключение

Основные научные результаты:

1. Впервые изученные автором агпаитовые сиениты дайки Мохнатые Рога характеризуются высоким коэффициентом агпаитности ($K_a \sim 1.23$) и содержат значительные концентрации Ti, Fe, Sr, Ba, Zr, Nb и PЗЭ.
2. Составы агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога на диаграмме отношения Na_2O+K_2O к SiO_2 попадают в поле конечных продуктов дифференциации ультраосновных лампрофиров Кольской щелочно-карбонатитовой провинции.
3. Отсутствие европиевой аномалии на спектрах распределения PЗЭ и обогащение стронцием указывает на характер дифференциации родоначального расплава без выделения плагиоклаза что свидетельствует о том, что источником агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога была магма значительно недосыщенная кремнеземом, с широким полем кристаллизации мелилита, а не плагиоклаза.
4. Замещение нефелина натролитом на поздней стадии кристаллизации агпаитовых сиенитов, свидетельствует о том, что они были сформированы на очень позднем этапе эволюции щелочного расплава и, возможно являются примером постепенного перехода из щелочного расплава в гидротермальный флюид.
5. Полученный методом K–Ar датирования возраст агпаитовых сиенитов дайки Мохнатые Рога составил 368 ± 9 млн лет, что совпадает с возрастом палеозойского щелочного магматизма на территории Кольской щелочно-карбонатитовой провинции.
6. Установлены особенности эволюции химического состава минералов группы лампрофиллита, которые представлены: лампрофиллитом, фторлампрофиллитом, баритолампрофиллитом, и фторбаритолампрофиллитом. Показано, что ранние генерации характеризуются широкими вариациями отношения Ba/Sr и высоким содержанием фтора. В более поздней генерации увеличивается содержание бария и понижается содержание фтора, на фоне уменьшения содержания натрия растет концентрация калия.
7. В ходе детального исследования химического состава и кристаллической структуры минералов группы лампрофиллита автором был установлен и описан новый минерал фторбаритолампрофиллит с общей формулой $(Ba, Sr, K)_2[(Na, Fe^{2+})_3TiF_2][Ti_2(Si_2O_7)_2O_2]$, который был утвержден комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации международной минералогической ассоциации (CNMNC IMA), регистрационный номер IMA № 2016-089.
8. Установлены особенности эволюции химического состава Ti-обогащенного эгирин-авгита, который характеризуется высокими содержаниями титана и циркония. Главное направление эволюции состава пироксенов заключается в увеличении эгириновой (Na, Fe^{3+}) составляющей и уменьшении диопсидового (Ca, Mg) и геденбергитового (Ca, Fe^{2+}) компонентов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Акименко (Филина) М.И.,** Когарко Л.Н., Сорохтина Н.В., Кононкова Н.Н., Мамонтов В.П. Новое проявление щелочного магматизма на Кольском полуострове, агпаитовая дайка в Кандалакшском районе // **Доклады академии наук.** 2014. Т. 458. № 2. С. 193-197.
2. **Акименко (Филина) М.И.,** Аксенов С.М., Сорохтина Н.В., Когарко Л.Н., Кононкова Н.Н. Расцветаева Р.К., Розенберг К.А. Химический состав минералов группы лампрофиллита и кристаллическая структура фтористого аналога баритолампрофиллита из агпаитовой дайки // **Кристаллография.** 2015. Т. 60. № 6. С. 887-896.

3. **Филина М.И.,** Когарко Л.Н., Кононкова Н.Н. Эволюция пироксенов в высокощелочных магматических системах на примере дайкового комплекса агпаитовых сиенитов и интрузии Нива (Кольский полуостров) // **Геохимия.** 2017. № 7. С. 653-659.
4. **Filina M.I.,** Aksenov S.M., Sorokhtina N.V., Chukanov N.V., Kononkova N.N., Belakovskiy D.I., Britvin S.N., Kogarko L.N., Chervonnyi A.D., Rastsvetaeva R.K. The new mineral fluorbarytolamprophyllite, $(\text{Ba,Sr,K})_2[(\text{Na,Fe}^{2+})_3\text{TiF}_2][\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{O}_2]$ and chemical evolution of lamprophyllite-group minerals in agpaitic syenites of the Kola Peninsula // **Mineral. Petrol.** 2019. V. 113. P. 533–553.
5. **Filina M.I.,** Kogarko L.N., Nielsen T.F. D. Mineralogical, geochemical, and isotopic data of a new special agpaitic dyke, enriched in high field strength elements (Eastern Part of Baltic Shield, Russia) // **Lithos.** 2022. V. 428-429. Iss. 7. P. 106828.

Материалы конференций:

1. **Filina M.I.,** Aksenov S.M., Sorokhtina N.V., Kogarko L.N., Kononkova N.N. The chemical composition of lamprophyllite group minerals and crystal structure of a new fluorine-rich barytolamprophyllite from the agpaitic dyke, area «Mokhnatye Roga» (Kola Peninsula) // Proceedings of XXXII International Conference «Alkaline Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits». Апатиты. 2015. С. 155-156.
2. **Филина М.И.,** Аксенов С.М., Сорохтина Н.В., Когарко Л.Н., Кононкова Н.Н., Расцветаева Р.К. Химический состав минералов группы лампрофиллита и кристаллическая структура фтористого аналога баритолампрофиллита из агпаитовой дайки // Материалы конференции «Mineral diversity research and preservation». София, Болгария. 2016. С.87-92.
3. **Филина М.И.,** Аксенов С.М., Сорохтина Н.В., Когарко Л.Н. Особенности химического состава и кристаллическая структура высокофтористого баритолампрофиллита из интрузии Нива (Кольский полуостров) // Материалы Международной научной конференции, посвященной 300-летию музея Ферсмана РАН. Москва. 2016. С. 188-189.
4. **Filina M.I.,** Kogarko L.N., Compositional evolution in pyroxenes of the peralkaline nepheline syenite (Kola Peninsula, Russia) // Minerals, Rocks and fluids: alphabet and worlds of planet Earth. 2nd European Mineralogical conference. 2016. Римини. Италия. Р. 436.
5. **Филина М.И.,** Когарко Л.Н., Кононкова Н.Н. Эволюция пироксенов в высокощелочных магматических системах на примере агпаитовых сиенитов Кольского полуострова // Труды XXXIII Международной конференции «Щелочной магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов». Москва. 2016. С. 139-140.
6. **Филина М.И.,** Аксенов С.М., Сорохтина Н.В., Чуканов Н.В., Кононкова Н.Н. Фторбаритолампрофиллит $(\text{Ba,Sr,K})_2[(\text{Na,Fe}^{2+})_3\text{TiF}_2][\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{O}_2]$ – новый минерал группы лампрофиллита из агпаитовых сиенитов // Сборник материалов Седьмой Российской молодёжной научно-практической школы «Новое в познании процессов рудообразования». Москва. 2017. с. 305-309.
7. **Филина М.И.,** Когарко Л.Н., Кононкова Н.Н. Высокотитанистый калиевый амфибол из агпаитовых сиенитов интрузии Нива и дайки участка «Мохнатые Рога» Кольский п-ов // Труды XV Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты. 2018. С. 376-378.
8. **Филина М.И.** Конечные стадии дифференциации щелочных магм на примере агпаитовых сиенитов интрузии Нива (Кольский полуостров) // Материалы конференции Щелочной и кимберлитовый магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов и алмазов. Апатиты. 2023. С. 414-419.