
АМФИБОЛЫ ЛОВОЗЕРСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

© 2023 г. Д. чл. Л. М. Лялина¹, *, д. чл. Я. А. Пахомовский¹,
Ю. А. Михайлова¹, Е. А. Селиванова¹

¹Геологический институт, ФИЦ Кольский научный центр РАН,
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская обл., 184209 Россия

*e-mail: l.lyalina@ksc.ru

Поступила в редакцию 03.05.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 02.10.2023 г.

На основе анализа литературных данных и собственных исследований авторами установлен 21 минеральный вид надгруппы амфиболов в породах Ловозерского массива (Кольский п-ов). Из них одиннадцать относятся к натриевым амфиболам, четыре являются натрий-кальциевыми и шесть – кальциевыми. Натриевые амфиболы широко развиты как в щелочных породах различных комплексов Ловозерского массива – дифференцированного, эвдиалитового и пойкилитового, в пегматитах и гидротермальных жилах, так и в вулканогенно-осадочных образованиях трапповой формации, представленных ксенолитами кровли массива. Магнезиоарфведсонит является самым распространенным амфиболом, часто становясь породообразующим и главным среди темноцветных минералов. Натрий-кальциевые амфиболы характерны для пород пойкилитового комплекса и ксенолитов вулканогенно-осадочных образований. Кальциевые амфиболы установлены исключительно в ксенолитах пород трапповой формации, подвергшихся в различной степени метаморфическим и метасоматическим преобразованиям. Рассмотрены особенности морфологии, химического состава, изоморфных замещений, парагенетические ассоциации амфиболов Ловозерского массива, их приуроченность к различным типам и комплексам пород, оценена их распространенность.

Ключевые слова: натриевые амфиболы, натрий-кальциевые амфиболы, кальциевые амфиболы, щелочные породы, Ловозерский массив

DOI: 10.31857/S0869605523060023, EDN: GOAWJW

ВВЕДЕНИЕ

Ловозерский массив, расположенный в западной части Кольского полуострова среди архейских гранито-гнейсов, является одним из крупнейших щелочных массивов мира. Он сложен разнообразными фельдшпатоидными сиенитами и фойдолитами (луявритами, фойяитами, ийолитами, уртитам и другими разновидностями пород), содержит многочисленные ксенолиты кровли и окружен ореолом фенитизации. Характерными аксессуарными, а часто и породообразующими, минералами большинства пород массива являются амфиболы, представленные, как показано ниже, значительным числом минеральных видов.

Уже в первых работах по минералогии Ловозерского массива было отмечено широкое распространение щелочной роговой обманки в породах и пегматитах (Минералы ..., 1937 и ссылки в ней). Период 1950–1960-х годов можно считать наиболее активным

в систематическом исследовании амфиболов, отразившемся в целом ряде публикаций как петрологической, так и чисто минералогической направленности, где описание минерала сопровождалось его химическим анализом. Именно эти материалы послужили для авторов предлагаемой работы отправной точкой сбора результатов аналитических исследований минералов надгруппы амфиболов из пород Ловозерского массива в единую базу данных, в которой каждый оригинальный химический состав минералов имеет собственный идентификационный номер, и свою историю заимствования в более поздние публикации, иногда и под другими названиями (табл. 1). Для ряда минералов определение до вида изменено нами в соответствии с действующей номенклатурой надгруппы амфиболов (Hawthorne et al., 2012).

В литературе по Ловозерскому массиву щелочные амфиболы указаны в качестве породообразующих минералов в альбититах (Бондарева и др., 1959), в амфиболовых лужавритах (Волков и др., 1962), в сфен-амфиболовом ийолит-мельтейгите (Герасимовский, Поляков, 1962), а также в ургитах и фойяитах¹ (Герасимовский и др., 1966) (табл. 1). Исследователи отмечают, что значительно различающиеся по составу породы массива содержат близкие по химическому составу амфиболы, что указывает на тесную генетическую связь между этими породами (Волков, 1962).

Существенные отличия отмечались в химическом составе “обычного” породообразующего амфибола нефелиновых сиенитов от амфибола из альбитов г. Сэлсурт, выраженные в резком снижении соотношения окисного и закисного железа в составе последнего (Бондарева и др., 1959). Подобные амфиболы с высоким содержанием Fe_2O_3 описаны под названием “рибекит” в пегматитах гор Лепхе-Нельм и Кедыквырпахк (Семенов, Капитонова, 1964) (табл. 1). В этой работе помимо “рибекита” подробно охарактеризованы амфиболы под названиями “арфведсонит”, “экерманнит”, “магнезиорибекит” и “катофорит” из нефелин-сиенитовых пегматитов, а также рассмотрен типоморфизм состава амфиболов в различных парагенетических ассоциациях редкометалльных минералов. Так, “арфведсонит”, практически не содержащий кальция и магния, присутствует в высоконатриевой ассоциации с мурманитом, рамзаитом, усингитом, эвдиалитом, нордитом в пегматитах гор Сенгисчорр, Пункаруайв и Карнасурт. Напротив, существенно кальциевый “катофорит” встречается в ассоциации с розенбушитом и ловенитом в пегматитах долины реки Муруай, генетически связанных с пойкилитами.

Все сведения из перечисленных, а также некоторых других работ, в кратком виде обобщены в монографии Е.И. Семенова (1972). В целом нужно отметить, что попытки диагностировать амфиболы до минерального вида предпринимались, однако чаще при описании пород использовалось общее название “амфибол”, без уточнения названия до видового.

В более поздних трудах по минералогии Ловозерского массива амфиболам уделено совсем немного внимания. Так, в монографии А.П. Хомякова (1990) перечислены пять минеральных видов группы амфиболов и даны два оригинальных анализа амфибола под названием “арфведсонит” из пегматитовой залежи Юбилейная на г. Карнасурт. В обзоре 2001 года (Пеков, 2001) указаны 12 минеральных видов из группы амфиболов, когда-либо упоминавшихся в публикациях по Ловозерскому массиву. Из них лишь для пяти видов (арфведсонита, магнезиоарфведсонита, фтормагнезиоарфведсонита, магнезиорибекита и магнезиоферригатофорита) приведены данные по морфологии и химическому составу, а описание магнезиоарфведсонита дополнено одним оригинальным химическим анализом (табл. 1). Оставшиеся за рамками работы (Пеков, 2001) амфиболы следует ставить под сомнение, поскольку морфологических, оптических, физических и рентгенографических данных недостаточно для определения минерального вида: необходимы достоверные результаты определения химического

¹ Здесь и далее в статье названия пород и минералов приводятся в соответствии с литературным источником.

Таблица 1. Названия амфиболов в публикациях, посвященных Ловозерскому массиву, и в соответствии с действующей номенклатурой
Table 1. Names of amphibole species in publications on the Lovozero massif, and in accordance to their current nomenclature

БД*	Авторское название и первоисточник	Название амфибола в публикациях, заимствованных анализ из первоисточника	Название по действующей номенклатуре 2012 г. (Hawthorne et al., 2012)
1156	Арфведсонит (Власов и др., 1959) г. Кедыквырпахк	Арфведсонит (Буссен, Сахаров, 1972)	Ферроэкерманнит**
1116	Литийсодержащий амфибол (Бондарева и др., 1959) анализ № 1	Без названия (Волков и др., 1962), Mg-рибекит (Буссен, Сахаров, 1972)	Магнезиофторарфведсонит
1117	Арфведсонит (Власов и др., 1959) роговообманковый луаврит, г. Куамдеспакх	Породообразующий амфибол (Бондарева и др., 1959), арфведсонит (Буссен, Сахаров, 1972)	Калиймагнезиоарфведсонит
1118	Арфведсонит (Власов и др., 1959) уртиты, г. Нинчурт	Арфведсонит (Герасимовский и др., 1966)	Феррифторнибеит**
926	Щелочной породообразующий амфибол (Волков и др., 1962) луаврит амфиболовый	Безназвания (Буссен, Сахаров, 1972), арфведсонит (Пеков, 2001)	Феррофторэкерманнит**
1125	Щелочной породообразующий амфибол (Волков и др., 1962) сфен-амфиболовый ийолит-мельтейгит	Без названия (Герасимовский, Поляков, 1962), без названия (Буссен, Сахаров, 1972)	Феррофторэкерманнит**
927	Щелочной породообразующий амфибол (Волков и др., 1962) луаврит амфиболовый	Безназвания (Буссен, Сахаров, 1972), арфведсонит (Пеков, 2001)	Фторарфведсонит**
1119	Арфведсонит (Семенов, Капитонова, 1964) г. Аллуайв	Арфведсонит (Семенов, 1972), арфведсонит (Буссен, Сахаров, 1972)	Ferri-rootname 14***
1120	Арфведсонит (Семенов, Капитонова, 1964) г. Сенгисчорр	Арфведсонит (Семенов, 1972)	Арфведсонит
1121	Арфведсонит (Семенов, Капитонова, 1964) г. Куйвчорр		Экерманнит
935	Эккерманит (Семенов, Капитонова, 1964) г. Непха	Арфведсонит (Семенов, 1972), ферриэкерманит**** (Буссен, Сахаров, 1972), фтормагнезиоарфведсонит (Пеков, 2001)	Калиймагнезиоарфведсонит
1122	Рибекит (Семенов, Капитонова, 1964) пегматит, г. Кедыквырпахк	Mg-рибекит (Семенов, 1972)	Калиймагнезиофторарфведсонит
1123	Рибекит (Семенов, Капитонова, 1964) гидротермалит, г. Непха	Mg-рибекит (Семенов, 1972)	Калиймагнезиофторарфведсонит
1124	Рибекит (Семенов, Капитонова, 1964) альбитит, г. Флора	Магнезиоарфведсонит (Буссен, Сахаров, 1972)	Магнезиофторарфведсонит

Таблица 1. Окончание

БД*	Авторское название и первоисточник	Название амфибола в публикациях, заимствованных анализ из первоисточника	Название по действующей номенклатуре 2012 г. (Hawthorne et al., 2012)
933	Катафорит (Семенов, Капитонова, 1964) г. Сенгисчорр	Арфведсонит (Семенов, 1972), катафорит (Буссен, Сахаров, 1972), магнезиоферрикатафорит (Пеков, 2001)	Феррифторкатафорит
1154	Арфведсонит (Герасимовский и др., 1966) эвдиалитовый луаврит	Арфведсонит (Семенов, 1972), без названия (Буссен, Сахаров, 1972)	Магнезиофторарфведсонит
1155	Арфведсонит (Герасимовский и др., 1966) амфиболовый луаврит	Арфведсонит (Семенов, 1972), без названия (Буссен, Сахаров, 1972)	Фторрихтерит
932	Магнезиорибекит (Герасимовский и др., 1966) обр. № 1969	Арфведсонит (Семенов, 1972), магнезиорибекит (Буссен, Сахаров, 1972), магнезиорибекит (Пеков, 2001)	Фторрихтерит
934	Арфведсонит (Герасимовский и др., 1966) фойяит	Арфведсонит (Семенов, 1972), без названия (Буссен, Сахаров, 1972), фтормагнезиоарфведсонит (Пеков, 2001)	Феррифторнибеит**
928	Арфведсонит (Семенов, 1972) г. Аллуайв	Арфведсонит (Пеков, 2001)	Арфведсонит
936	LiMnMg-рибекит (Семенов, 1972) г. Непха	Фтормагнезиоарфведсонит (Пеков, 2001)	Калиймагнезиофторарфведсонит
1157	Без названия (Буссен, Сахаров, 1972) эвдиалитовый луаврит, г. Аллуайв, обр. № 2А		Магнезиофторарфведсонит
1158	Без названия (Буссен, Сахаров, 1972) сфеновый ийолит, обр. № 2207-К		Магнезиофторарфведсонит
929	Арфведсонит (Хомяков, 1990) г. Карнасург	Магнезиоарфведсонит (Пеков, 2001)	Магнезиоарфведсонит
930	Арфведсонит (Хомяков, 1990) г. Аллуайв	Магнезиоарфведсонит (Пеков, 2001)	Рихтерит
931	Магнезиоарфведсонит (Пеков, 2001) альбитизированный мурманитовый луаврит, г. Флора		Магнезиоарфведсонит
1073	Калийарфведсонит (Pekov et al., 2004) пегматит, г. Кедыквырпахк		Калийарфведсонит

* Номер анализа в базе данных. Все анализы приведены с указанными номерами БД в электронном приложении, файл Литер_данные.xlsx. Для единообразия расчета для всех анализов железо пересчитано на FeO. ** Неутвержденный (гипотетический) минеральный вид или промежуточный член серии твердых растворов. *** Ferri-rootname 14 – Na(NaMn)(Mg₄Fe³⁺)(Si₇Al)O₂₂(OH)₂ – крайний член изоморфного ряда с Rootname 14 Na(NaMn)(Mg₄Al)(Si₇Al)O₂₂(OH)₂ (Hawthorne et al., 2012). **** Феррижерманнит = магнезиоарфведсонит (см. Раздел “Магнезиоарфведсонит”).

Таблица 2. Изменения названий и формул минеральных видов надгруппы амфиболов в номенклатурах разных лет
Table 2. Changes of names and formulas of amphibole supergroup mineral species in their nomenclatures of different periods

1978 г. (Leake, 1978)	1997 г. (Leake et al., 1997)	2012 г. (Hawthorne et al., 2012)
Магнезиоферрикатофорит NaCaNaMg ₄ Fe ³⁺ Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂	Магнезиокатофорит Na(CaNa)Mg ₄ (Al,Fe ³⁺)(Si ₇ AlO ₂₂)(OH) ₂	Феррикатофорит Na(NaCa)(Mg ₄ Fe ³⁺)(Si ₇ Al)O ₂₂ (OH) ₂
Магнезиоаломокатофорит NaCaNaMg ₄ AlSi ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂	Магнезиокатофорит Na(CaNa)Mg ₄ (Al,Fe ³⁺)(Si ₇ AlO ₂₂)(OH) ₂	Катофорит Na(NaCa)(Mg ₄ Al)(Si ₇ Al)O ₂₂ (OH) ₂
Феррикатофорит	Катофорит	Ферроферрикатофорит
NaCaNaFe ₄ ²⁺ Fe ³⁺ Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂	Na(CaNa)Fe ₄ ²⁺ (Al,Fe ³⁺)(Si ₇ AlO ₂₂)(OH) ₂	Na(NaCa)(Fe ₄ ²⁺ Fe ³⁺)(Si ₇ Al)O ₂₂ (OH) ₂

состава, исключая также и возможное загрязнение примесями других фаз при проведении анализа.

По этим причинам и для относительно подробно описанных ранее амфиболов с приведенными химическими составами ситуация на сегодня требует уточнения. Это связано как со значительно продвинувшимися аналитическими возможностями, так и вследствие трижды за этот период произошедших изменений номенклатуры группы амфиболов (Leake, 1978; Leake et al., 1987; Hawthorne et al., 2012), что показано нами на примере натрий-кальциевых амфиболов в табл. 2.

В более поздних работах для решения петрологических задач химический состав амфиболов Ловозерского массива исследовался с помощью рентгеновского электронно-зондового микроанализа (Electron Probe Microanalysis, EPMA) (Зайцев, Сенин, 2008; Корчак и др., 2011; Mikhailova et al., 2019).

Предлагаемая работа является результатом детального изучения рассматриваемых минералов в Ловозерском массиве с его богатейшей и уникальной минералогией. Обзор амфиболов Ловозерского массива включает историю их изучения, описание видовой разнообразия, минералогические характеристики (морфология, свойства, химический состав, включения, парагенетические ассоциации), распространенность в породах массива. Опубликованные в литературе и собственные результаты аналитических исследований амфиболов Ловозерского массива собраны нами в базу данных, в которой каждый образец (химический состав) имеет собственный уникальный номер Базы Данных (БД), и именно под этим номером приводится в описаниях, таблицах и на диаграммах. В данную работу включены все достоверно установленные минеральные виды группы амфиболов: (1) новые для Ловозерского массива, (2) известные ранее, но изменившие свое видовое название в рамках новой номенклатуры, (3) недостаточно изученные амфиболы. Предлагаемая работа имеет еще и кадастровую направленность, поскольку мы приводим устаревшие названия амфиболов в соответствии с действующей номенклатурой (табл. 1, электронное приложение, файл Литер_данные.xlsx). Авторами установлено 14 минеральных видов надгруппы амфиболов, что в сумме с литературными данными составило 21 минеральный вид.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛОВОЗЕРСКОГО МАССИВА

Ловозерский щелочной массив представляет собой расслоенный лакколит с широкой “ножкой” (Герасимовский и др., 1966), имеющий в плане форму прямоугольника со скругленными углами площадью 650 км² (рис. 1). По геофизическим данным (Шаблинский, 1963), щелочные породы прослеживаются до глубины 7 км. Нижняя граница их распространения не установлена, контакты массива с вмещающими породами практически вертикальны. Возраст внедрения массива в архейские гранито-

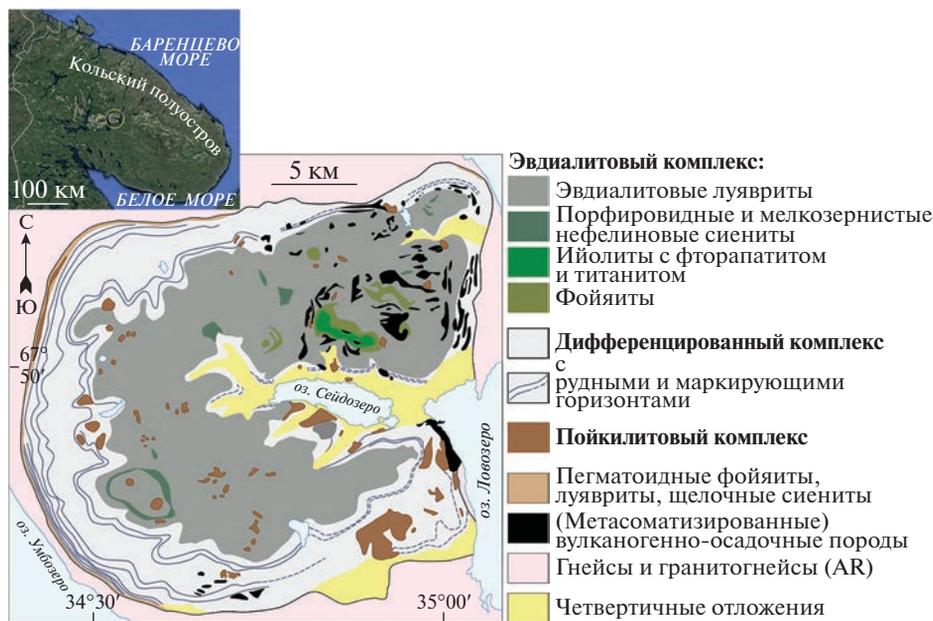


Рис. 1. Расположение Ловозерского массива в пределах Кольского полуострова (вверху слева, спутниковый снимок, Landsat/Corpnicus IBCAO) и геологическая схема массива по (Л.Г. Сапрыкина и др., 1977 г.), с упрощениями.

Fig. 1. Position of Lovozero massif in the Kola Peninsula (top left – satellite photograph) and geological scheme of the massif after (Saprykina et al., 1977), simplified.

гнейсы и девонские вулканогенно-осадочные породы оценивается в 360–370 млн лет (Kramm, Kogarko, 1994; Wu et al., 2010; Mitchell et al., 2011).

Массив состоит из трех крупных комплексов интрузивных горных пород: эвдиалитового, дифференцированного и пойкилитового (рис. 1). Дифференцированный комплекс является самым крупным, на его долю приходится 77% общего объема щелочных пород (Герасимовский и др., 1966). Комплекс состоит из множества субгоризонтальных слоев (или ритмов). Каждый ритм представляет собой последовательность пород (сверху вниз): лувярит–фойяит–уртит или лувярит–фойяит. Лувяриты – это мезо- или меланократовые нефелиновые сиениты трахитоидной структуры, обусловленной параллельной ориентировкой лейст калиевого полевого шпата. Фойяиты представляют собой лейкократовые нефелиновые сиениты трахитоидной или массивной структуры, а уртиты – практически мономинеральные нефелиновые породы. Переходы между разными породами внутри ритма постепенные, а границы ритмов – резкие, часто маркируемые пластовыми или линзовидными пегматитами.

Эвдиалитовый комплекс слагает верхнюю часть массива. Он прорывает и перекрывает дифференцированный комплекс и, по данным И.В. Буссен и А.С. Сахарова (1958), имеет форму этмолита. На долю эвдиалитового комплекса приходится около 18% общего объема щелочных пород массива (Герасимовский и др., 1966). Главными породами эвдиалитового комплекса являются лувяриты, обогащенные минералами группы эвдиалита – так называемые эвдиалитовые лувяриты. Среди них в подчиненном количестве присутствуют пластовые или линзовидные тела фойяитов, уртитов (редко), а также мелкозернистых и порфиroidных нефелиновых сиенитов. Послед-

ние содержат крупные вкрапленники микроклин-пертита и/или нефелина в мелкозернистой основной массе.

Среди пород эвдиалитового и дифференцированного комплексов распространены линзовидные или неправильной формы тела неравномернозернистых и пойкилитовых фельдшпатоидных сиенитов. Эти породы относятся к пойкилитовому комплексу, составляющему около 5% общего объема массива. Главной морфологической особенностью пород пойкилитового комплекса является присутствие крупных (до 8 см длиной) кристаллов калиевого полевого шпата, насыщенных многочисленными мелкими включениями фельдшпатоидов – нефелина, содалита, вишневиты. Пойкилитовые фельдшпатоидные сиениты постепенно, при снижении количества пойкилитового полевого шпата переходят в неравномернозернистые разновидности. С породами пойкилитового комплекса связаны практически все пегматиты и гидротермальные тела Ловозерского массива (Семенов, 1972).

В Ловозерском массиве, особенно в его северо-восточной части, широко распространены ксенолиты кровли. Неизменные ксенолиты сложены вулканогенно-осадочными породами трапповой формации и представляют собой переслаивание (оливиновых) базальтов, базальтовых туфов, туффитов, кварцитов и песчаников. Под воздействием щелочных расплавов эти породы были фенитизированы и ороговикованы. Разнообразный состав исходных пород и разная интенсивность воздействия со стороны щелочных расплавов обусловили очень пестрый минеральный состав ксенолитов. Действительно, в непосредственной близости находятся ксенолиты, сложенные практически неизменными вулканогенно-осадочными породами, фенитами и разнообразными по составу роговиками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях использована представительная коллекция образцов пород различных комплексов Ловозерского массива, собранная с 1995 по 2021 годы в ходе полевых работ сотрудниками Геологического института ФИЦ КНЦ РАН (г. Апатиты) – Ю.П. Меньшиковым, Г.Ю. Ивановым, В.Н. Яковенчуком, Ю.А. Михайловой и Я.А. Пахомовским, а также при опробовании керна скважин, пробуренных в 1989–1992 гг. Исследования минералов проводились в штучных образцах (макроскопическое изучение, рентгеноструктурная диагностика) и в плоскополированных препаратах – комбинированных шлифах (оптические, электронно-микроскопические, электронно-зондовый методы).

Для макроскопических исследований были использованы стереомикроскопы Stemi (Carl Zeiss Microscopy, Германия) и Motic (Motic, Китай). Рентгеновская диагностика проводилась по порошковым рентгенограммам, полученным фотометодом на УРС-55 (Буревестник, Россия), камера РКУ 114.6 мм, 40 кВ, 15 мА, Fe-излучение.

Диагностика минералов по химическому составу, изучение ассоциаций минералов и их взаимоотношений выполнено на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) LEO-1450 (Carl Zeiss Microscopy, Германия), оснащенном рентгеновской энергодисперсионной системой AZtec с детектором ULTIM MAX 100 (OXFORD Instruments, Великобритания). Химический состав минералов определялся на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA MS-46 (Франция) и при помощи системы AZtec. Результаты химического анализа минералов, указанные в таблицах как “EPMA” и “AZtec”, получены при ускоряющем напряжении 22 и 20 кВ и токе электронного зонда 30 и 2.0 нА для рентгеновского микроанализатора и для электронного микроскопа, соответственно.

Все опубликованные ранее и собственные анализы рассчитывались по одному алгоритму, с использованием авторской электронной таблицы Excel (Locock, 2014). Электронная таблица позволяет, используя данные о химическом составе, классифи-

цировать ромбические и моноклинные амфиболы в соответствии с действующей номенклатурой (Hawthorne et al., 2012). Таблица предоставляет возможности для оценки отношений $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ и $\text{Mn}^{3+}/\Sigma\text{Mn}$ и содержания ОН-групп. Различные схемы нормализации катионов могут выбираться автоматически или вручную. Для каждого анализа выходные данные включают группу, подгруппу, название минерального вида амфибола и его формулу. В данной работе основание для расчета подбиралось вручную с соблюдением условий наименьшего отклонения в заполнении позиций, наилучшей суммы анализа и соответствия теоретической формуле минерала.

Общая формула амфиболов может быть представлена в виде $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}W_2$, где буквенные обозначения соответствуют разным группам катионов. Нормирование на сумму 13 катионов подразумевает расчет на сумму $T + C = 13$, при нормировании на суммы 15 и 16 катионов расчет выполнен на сумму $T + C + B = 15$ и $T + C + B + A = 16$ соответственно.

Обширная база данных химических составов амфиболов, включающая 620 анализов, была подвергнута критическому отбору результатов. Приняты следующие критерии надежности анализов: сумма анализа, с учетом рассчитанных значений FeO , Fe_2O_3 , MnO , Mn_2O_3 , H_2O^+ , должна находиться в интервале 98–101 мас. %; отклонения в заполнении катионных позиций не должны превышать 0.05 а.ф. (атомов на формулу). Все анализы, отвечающие принятым условиям, использованы для построения диаграмм и собраны в электронном приложении <https://disk.yandex.ru/d/caKmFANzoitCjA>. В статье приведены лишь наиболее представительные анализы.

В схемах изоморфных замещений и в подписях на диаграммах латинская буква в верхнем индексе слева от символа химического элемента обозначает группу элементов согласно стандартной формуле $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}W_2$. Например, ^BCa — кальций в группе B . Если упоминается несколько элементов из одной группы, то они объединяются в скобки, например, $^C(\text{MgFe}^{3+})$ — магний и трехвалентное железо группы C . Валентность указана в верхнем индексе справа от символа элемента только для гетеровалентных элементов. В статье использованы символы-аббревиатуры минералов по (Warr, 2021).

НАТРИЕВЫЕ АМФИБОЛЫ

Магнезиоарфведсонит $\text{NaNa}_2(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

“Магнезиоарфведсонит” с формулой $\text{Na}_2\text{Ca}_{0,5}\text{Mg}_{3,5}\text{Fe}_{1,5}^{3+}\text{Si}_{7,5}\text{Al}_{0,5}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ был предложен в классификации щелочных амфиболов А. Мияширо (Miyashiro, 1957). Под этим названием, но уже с нынешней формулой конечного члена этот амфибол присутствовал во всех номенклатурах амфиболов (Leake, 1978; Leake et al., 1987; Hawthorne et al., 2012). Использование в названии минерала корневой части “арфведсонит” является одним из немногих исключений, сделанных для Mg- и Al-доминантных членов группы амфиболов. Строго, по принятым Международной минералогической ассоциацией (ММА) правилам, арфведсонит $\text{NaNa}_2(\text{Fe}_4^{2+}\text{Fe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ должен был бы называться “ферроферриэкерманнит”. Сохранение корневого названия “арфведсонит” обусловлено его прочно укоренившимся положением в петрологической литературе. Несмотря на выделение магнезиоарфведсонита как самостоятельного минерального вида еще в 1957 году, его полное описание с уточнением кристаллической структуры было представлено в Комиссию по новым минералам, номенклатуре и классификации (КНМНК, ММА) лишь в 2014 г. (Oberti et al., 2014).

По оценке И.В. Пекова (Пеков, 2001), в породах Ловозерского массива магнезиоарфведсонит является самым распространенным среди амфиболов и одним из главных темноцветных минералов в целом. Зачастую исследователи массива не делали

Таблица 3. Распространенность Na-амфиболов в породах Ловозерского массива
Table 3. Abundance of sodium amphiboles in rocks of the Lovozero alkaline massif

Минерал	Комплекс			
	дифференцированный	эвдиалитовый	пойкилитовый	вулканогенно-осадочные породы
Магнезиоарфведсонит	– луаврит; – фойяит; – уртит	– эвдиалитовый луаврит; – луаврит; – порфириовидный нефелиновый сиенит; – уртит	– фельдшпатоидный пойкилитовый сиенит; – неравномернозернистый нефелиновый сиенит	– арфведсонито-нефелино-полевошпатовый роговик; – фенит; – оливиновый базальт
Арфведсонит	–	– луаврит	–	–
Магнезиофторарфведсонит	– уртит	– луаврит	–	– амфиболо-анортитовый роговик
Калийарфведсонит	–	–	–	– фенитизированная вулканогенно-осадочная порода

различий между арфведсонитом и магнезиоарфведсонитом. Из опубликованных анализов “арфведсонита” Ловозерского массива анализ БД 929 (табл. 1) отвечает, в действительности, магнезиоарфведсониту. Под этим названием минерал был приведен в работе (Пеков, 2001). Некоторое время рибекит из работы (Семенов, Капитонова, 1964) (табл. 1, БД 1124) считался “магнезиоарфведсонитом” (Буссен, Сахаров, 1972), но в соответствии с действующей номенклатурой этот амфибол следует называть магнезиофторарфведсонитом.

По нашим данным, магнезиоарфведсонит достоверно присутствует во всех комплексах пород Ловозерского массива (табл. 3).

Характерные черты морфологии магнезиоарфведсонита в породах Ловозерского массива

В породах дифференцированного комплекса магнезиоарфведсонит обычен в виде гипидиоморфных кристаллов, содержащих многочисленные вростки идиоморфных индивидов эгирина (рис. 2, а). Реже магнезиоарфведсонит наблюдается в виде включений неправильной формы в эгирине. Еще одной, редкой формой нахождения магнезиоарфведсонита в урритах дифференцированного комплекса являются ксеноморфные выделения совместно с кальсилитом, эльпасолитом, микроклин-пертитом и эгирином в интерстициях между кристаллами нефелина. В кристаллах магнезиоарфведсонита бывает проявлена химическая неоднородность, но вариации содержания элементов не выходят за границы минерального вида.

Явно доминирующей формой нахождения магнезиоарфведсонита в породах эвдиалитового комплекса являются ксеноморфные выделения в агрегатах призматических кристаллов эгирина, заполняющие интерстиции породообразующих минералов – лейст калиевого полевого шпата, кристаллов нефелина, минералов группы эвдиалита (рис. 2, б). Редко индивиды магнезиоарфведсонита в подобных агрегатах приобретают идиоморфные очертания (рис. 2, в). Выделения амфибола могут проявлять химическую неоднородность, со смещением состава в отдельных участках до арфведсонита (рис. 2, б). Иными, редко встречающимися формами нахождения магнезиоарфведсонита в породах эвдиалитового комплекса являются ксеноморфные зерна в основной массе породы, зерна или сростки с эгирином в агрегатах натролита, гипидиоморфные

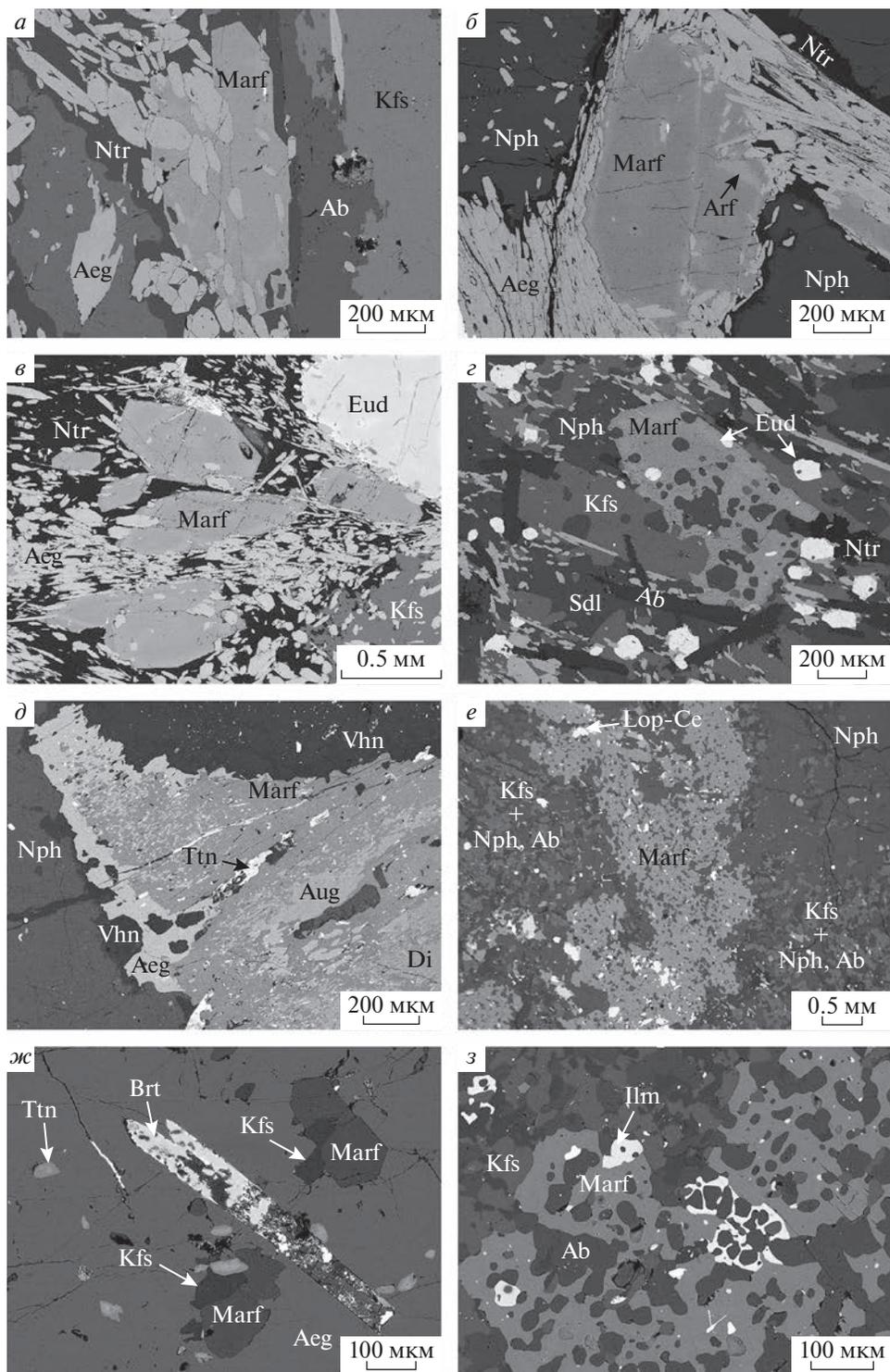


Рис. 2. Морфология магнезиоарфведсонита в породах Ловозерского щелочного массива. *a* – гипидиоморфные кристаллы магнезиоарфведсонита с вростками эгирина; луаврит, дифференцированный комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-334; *b* – ксеноморфные выделения магнезиоарфведсонита с участками арфведсонита в агрегате эгирина; луаврит, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-224-3 (аналитик А.В. Базай); *в* – гипидиоморфные и идиоморфные кристаллы магнезиоарфведсонита в агрегате эгирина и натролита; луаврит, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-237-89 (аналитик А.В. Базай); *г* – пойкилитовый кристалл магнезиоарфведсонита; контакт луаврита с порфиroidным нефелиновым сиенитом, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-154/17; *д* – ксеноморфное выделение пертитоподобных сростаний магнезиоарфведсонита и пироксенов (диопсид, авгит) в кайме эгирина; фельдшпатоидный (вишневитовый) пойкилитовый сиенит, пойкилитовый комплекс, г. Пункаруайв, обр. ЛВ-427/1; *е* – пойкилитовое зерно магнезиоарфведсонита; неравномернозернистый нефелиновый сиенит, пойкилитовый комплекс, г. Сенгисчорр, обр. ЛВ-371/2; *ж* – кристалл и зерно магнезиоарфведсонита; фенит, г. Куамдеспакх, обр. ЛВ-160-31; *з* – пойкилитовые зерна магнезиоарфведсонита; амфиоло-нефелино-полевошпатовый роговик, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-132. СЭМ, BSE (обратно-рассеянные электроны) изображения. Marf – магнезиоарфведсонит, Arf – арфведсонит, Kfs – калиевый полевой шпат, Nph – нефелин, Ntr – натролит, Eud – эвдиалит, Aeg – эгирин, Ab – альбит, Sdl – содалит, Aug – авгит, Di – диопсид, Vhn – вишневит, Ttn – титанит, Lop-Ce – лопарит-(Ce), Brt – барит, Ilm – ильменит.

Fig. 2. Morphology of magnesioarfvedsonite in rocks of the Lovozero alkaline massif.

кристаллы пойкилитового строения с включениями нефелина, калиевого полевого шпата, минералов группы эвдиалита (рис. 2, *г*).

В породах пойкилитового комплекса магнезиоарфведсонит очень тесно пространственно и генетически связан с пироксенами – эгирином, диопсидом, авгитом, образуя с ними сростания различной морфологии. Наиболее часто встречаются агрегаты незакономерных (пертитоподобных) сростаний с различным соотношением минералов, каймы эгирина на ксеноморфных зернах амфибола (рис. 2, *д*) и включения магнезиоарфведсонита в эгирине. Также магнезиоарфведсонит установлен в виде пойкилитовых зерен с многочисленными включениями нефелина, титанита, лопарита-(Ce), фторопатита, альбита (рис. 2, *е*), вростками скелетных кристаллов ринкита-(Ce).

В ксенолитах вулканогенно-осадочных пород магнезиоарфведсонит обычно представлен ксеноморфными зернами, реже – идиоморфными призматическими кристаллами, в основной массе породы (рис. 2, *ж*). Крупные индивиды имеют, как правило, пойкилитовое строение за счет многочисленных включений нефелина, калиевого полевого шпата, гидроксилпатита (рис. 2, *з*). Магнезиоарфведсонит установлен также в виде включений неправильной формы в призматических и длиннопризматических кристаллах эгирина.

Химический состав магнезиоарфведсонита в породах Ловозерского массива

Химический состав магнезиоарфведсонита широко варьирует по содержанию как видообразующих, так и примесных элементов (электронное приложение, файл Na-Amp.xlsx, табл. 4). Наиболее выражены изоморфные замещения по следующим схемам:

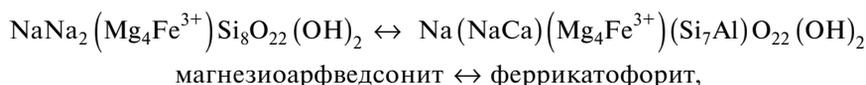


Таблица 4. Химический состав (мас. %) минералов подгруппы Na-амфиболов из пород Ловозерского массива
 Table 4. Chemical composition (wt %) of sodium amphiboles in rocks of the Lovozero massif

Компонент	Минерал														
	Marf					Arf					Mfarf				
	дифференцированный	эвдиалитовый	пойкилитовый	вулк.-осад.	эвдиал.	диффер.	эвдиал.	вулк.-осад.	вулк.-осад.	эвдиал.	диффер.	эвдиал.	вулк.-осад.	вулк.-осад.	
	Номер анализа в базе данных (БД)														
	450	621	1138	867	871	96	1205	1098	956	418	852	196	980		
SiO ₂	52.30	54.58	52.60	53.74	53.34	55.85	54.35	52.93	53.03	52.28	52.74	52.65	48.79		
TiO ₂	1.60	1.06	2.05	1.76	1.00	0.60	1.05	1.82	1.62	2.08	1.28	1.12	0.38		
ZrO ₂	—	—	—	0.06	—	—	—	—	—	—	—	0.22	—		
Al ₂ O ₃	1.55	0.73	1.54	1.17	0.74	0.76	1.15	1.75	0.95	1.35	1.00	1.40	1.16		
V ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	0.11	—	—	—	0.10	0.85		
Fe ₂ O ₃ расч	9.56	8.19	8.11	4.73	7.28	6.52	6.71	5.75	6.49	6.76	8.16	5.00	6.83		
FeO расч	9.64	6.53	12.30	12.72	12.92	6.44	10.31	12.11	16.39	13.18	8.77	10.06	24.97		
MnO	1.45	1.18	1.47	1.32	2.30	0.98	3.32	0.51	1.60	1.59	1.37	1.94	0.64		
NiO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38		
ZnO	—	0.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.12	—		
MgO	10.61	13.67	8.94	10.00	8.74	15.05	10.11	10.97	7.22	8.47	11.99	12.36	2.76		
CaO	1.30	1.41	1.24	1.04	0.24	1.89	0.67	1.81	—	1.07	1.18	2.78	0.83		
Na ₂ O	8.80	8.39	8.81	8.66	8.46	9.01	9.06	8.46	9.01	8.21	8.63	7.66	6.02		
K ₂ O	1.56	1.50	1.62	1.74	2.12	1.49	1.88	1.32	1.67	1.66	1.61	1.61	4.29		
H ₂ O расч	1.19	1.82	0.99	1.61	1.19	1.45	1.04	1.61	1.62	0.75	0.73	0.86	1.79		
F	1.00	—	1.18	—	1.20	1.10	1.60	—	—	1.60	2.10	1.91	—		
—O=F ₂	0.42	0.00	0.50	0.00	0.51	0.46	0.67	0.00	0.00	0.67	0.88	0.80	0.00		
Сумма	100.14	99.14	100.35	98.55	99.02	100.68	100.58	99.15	99.60	98.33	98.66	98.99	99.69		
Формульные коэффициенты атомов, рассчитанные на указанной основе, и их распределение в стандартной формуле A ₀₋₁ B ₂ C ₅ T ₈ O ₂₂ W ₂ число катионов															
Основа расчета*	16	13	16	16	13	16	16	16	16	13	16	16	16	16	
Si	7.74	7.95	7.84	8.05	8.04	7.97	8.00	7.86	8.03	7.95	7.85	7.83	7.80	7.80	
Al	0.26	0.05	0.16	—	—	0.03	—	0.14	—	0.05	0.15	0.17	0.20	0.20	
Сумма T	8.00	8.00	8.00	8.05	8.04	8.00	8.00	8.00	8.03	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	

Таблица 4. Продолжение

Компонент	Минерал													
	Marf						Arg						Mfarf	Parf
	Комплексы пород Ловозерского массива													
	дифференцированный	эвдиалитовый	пойкилитовый	вулк.-осад.	эвдиал.	диффер.	эвдиал.	852	196	вулк.-осад.	980			
Номер анализа в базе данных (БД)														
	450	621	1138	867	871	96	1205	1098	956	418	852	196	980	
Ti	0.18	0.12	0.23	0.20	0.11	0.06	0.12	0.20	0.19	0.24	0.14	0.13	0.05	
Zr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	—	
Al	0.01	0.07	0.11	0.21	0.13	0.10	0.20	0.17	0.17	0.19	0.03	0.08	0.01	
V	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—	—	—	0.01	0.11	
Fe ³⁺	1.07	0.90	0.91	0.53	0.83	0.70	0.74	0.64	0.74	0.77	0.91	0.56	0.82	
Ni	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.05	
Zn	—	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—	
Mn ²⁺	0.18	0.15	0.19	0.17	0.29	0.12	0.41	0.04	0.20	0.21	0.16	0.20	—	
Fe ²⁺	1.19	0.80	1.53	1.59	1.63	0.77	1.27	1.50	2.08	1.68	1.09	1.25	3.30	
Mg	2.34	2.97	1.99	2.23	1.96	3.20	2.22	2.43	1.63	1.92	2.66	2.74	0.66	
Сумма С	4.97	5.02	4.96	4.93	4.95	4.95	4.96	4.99	5.01	5.01	4.99	5.00	5.00	
Mn ²⁺	—	—	—	—	—	—	—	0.03	—	—	0.01	0.04	0.09	
Ca	0.21	0.22	0.20	0.17	0.04	0.29	0.11	0.29	—	0.17	0.19	0.44	0.14	
Na	1.79	1.78	1.80	1.83	1.96	1.71	1.89	1.69	2.00	1.83	1.80	1.52	1.74	
Сумма В	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.00	2.00	1.97	
Na	0.73	0.59	0.74	0.68	0.51	0.78	0.69	0.75	0.65	0.59	0.69	0.69	0.13	
K	0.30	0.28	0.31	0.33	0.41	0.27	0.35	0.25	0.32	0.32	0.31	0.31	0.87	
Сумма А	1.03	0.87	1.05	1.01	0.92	1.05	1.04	1.00	0.97	0.91	2.00	2.00	2.00	

Таблица 4. Окончание

Компонент	Минерал												
	Магf			Агf			Мfагf			Pагf			
	дифференцированный	эвдиалитовый	пойкилитовый	вулк.-осад.	эвдиал.	диффер.	эвдиал.	вулк.-осад.	эвдиал.	диффер.	эвдиал.	вулк.-осад.	
	Комплексы пород Ловозерского массива												
	Номер анализа в базе данных (БД)												
	450	621	1138	867	871	96	1205	1098	956	418	852	196	980
ОН	1.18	1.77	0.98	1.60	1.20	1.38	1.02	1.59	1.63	0.76	0.72	0.85	1.91
F	0.47	–	0.56	–	0.57	0.50	0.75	–	–	0.77	0.99	0.90	–
O	0.36	0.23	0.46	0.40	0.23	0.13	0.23	0.41	0.37	0.48	0.29	0.25	0.09
Сумма И/	2.01	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.00

Примечание. Магf – магнезиорарфвельсонит, Агf – арфвельсонит, Мfагf – магнезиофторарфвельсонит, Pагf – калийарфвельсонит. * Для всех анализов расчет к.ф. выполнен по алгоритму (Lосock, 2014) с использованием авторской электронной таблицы Excel. Отсутствие аналитических определений Н₂О, FeO, Fe₂O₃, MnO, Mn₂O₃ определено расчет формульных коэффициентов по катионам, число которых для нормирования (основа расчета) подбиралось с условием наименьшего отклонения в заполнении позиций, наилучшей суммы анализа и соответствия теоретической формуле минерала. Нормирование на 13 катионов подразумевает расчет на катионы T + C, при нормировании на 16 катионов расчет выполнен на сумму T + C + B + A = 16. См. электронное приложение, файл Na-Amp.xlsx.

Анализы:

- 450 – фойбит, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-309. ЕРМА.
- 621 – лувэрит, г. Селеурт. Обр. ЛВ-01-07. ЕРМА.
- 1138 – уртит, г. Карнасурт. Обр. ЛВ-III-4-4. AZtec.
- 867 – лувэрит, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-224-3. ЕРМА. Аналитик Базай А.В.
- 871 – уртит, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-224/146. ЕРМА.
- 96 – неравномерностерный нефелиновый сиенит, г. Сентгисчорр. Обр. ЛВ-371/1. ЕРМА.
- 1205 – фельшпатоидный пойкилитовый сиенит, г. Пункаруайв. Обр. ЛВ-429. AZtec.
- 1098 – оливиновый базальт, г. Киткюнн. Обр. ЛВ-01-51В. ЕРМА.
- 956 – лувэрит, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-224-3. AZtec.
- 418 – уртит, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-315/1. ЕРМА.
- 852 – лувэрит, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-169-120. ЕРМА.
- 196 – амфиболо-анортитовый роговик, г. Куйвчорр. Обр. ЛВ-121. AZtec.
- 980 – фенитизированная вулканогенно-осадочная порода, г. Куамдспахж. Обр. ЛВ-152/4. AZtec.

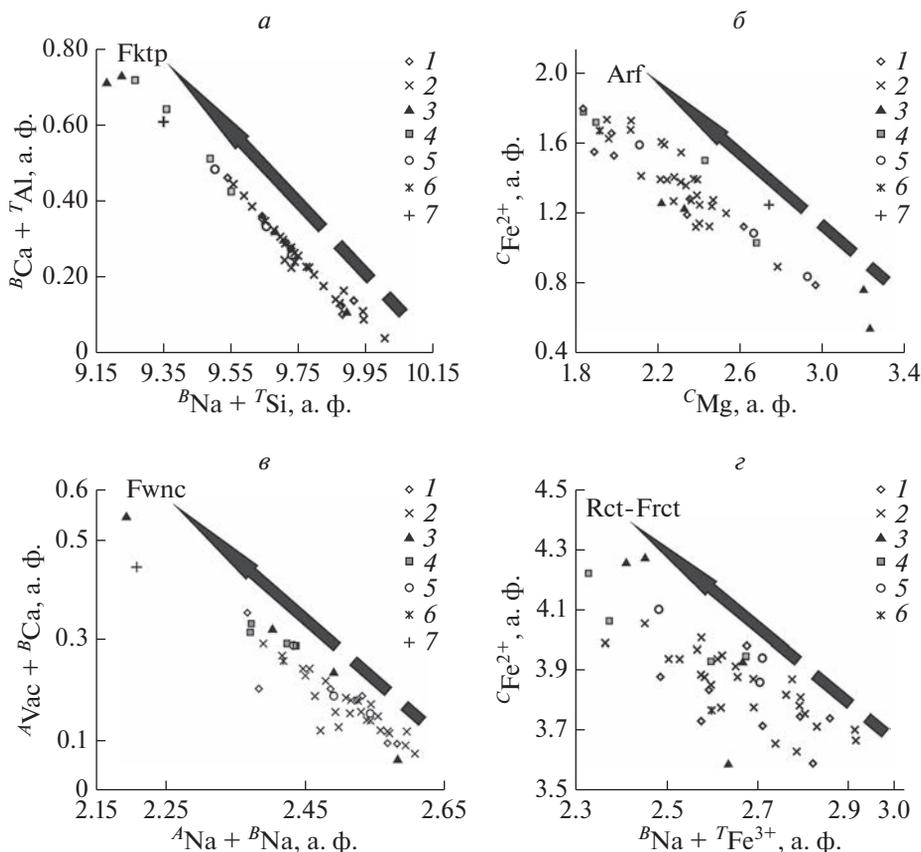


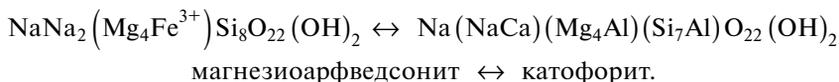
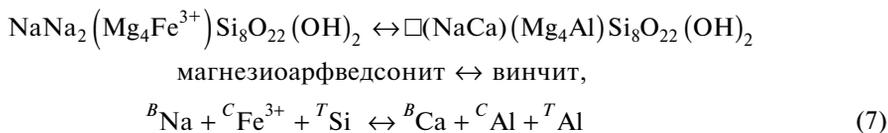
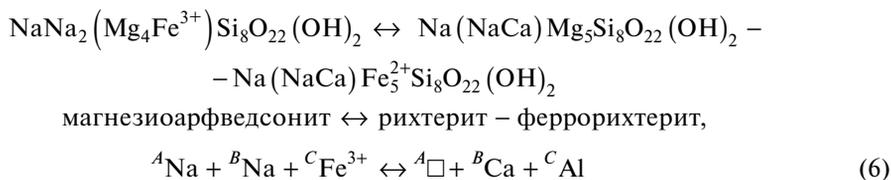
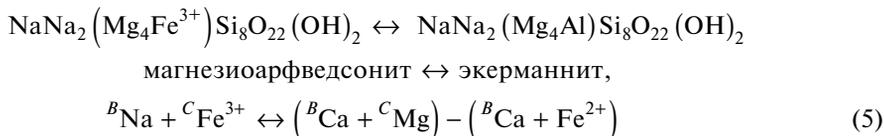
Рис. 3. Корреляция элементов при изоморфных замещениях в магнезиоарфведсоните. 1 – магнезиоарфведсонит из пород дифференцированного комплекса, 2 – магнезиоарфведсонит из пород эвдиалитового комплекса, 3 – магнезиоарфведсонит из пород пойкилитового комплекса, 4 – магнезиоарфведсонит из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород, 5 – магнезиофторарфведсонит из пород эвдиалитового комплекса, 6 – магнезиофторарфведсонит из пород дифференцированного комплекса, 7 – магнезиофторарфведсонит из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород, 8 – калийарфведсонит из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород. Fktp – феррикатафорит, Arf – арфведсонит, Rct – рихтерит, Frct – феррорихтерит, Fwnc – ферривинчит.

Fig. 3. Correlation of elements in isomorphous replacements for magnesio-arfvedsonite.



Диаграммы, иллюстрирующие эти замещения (рис. 3, *a–e*), показывают почти полное перекрытие полей содержаний компонентов в магнезиоарфведсоните из разных комплексов пород.

Прослеживается также изоморфизм с экерманнитом и с конечными членами группы натрий-кальциевых амфиболов – винчитом, катофоритом, рихтеритом и ферро-рихтеритом (Hawthorne et al., 2012):



Корреляции по схемам (4)–(7) выражены заметно слабее (например, для схемы (5) на рис. 3, *e*), а для некоторых очевидных замещений, например, магнезиоарфведсонит \leftrightarrow калиймагнезиоарфведсонит ($\text{Na} \leftrightarrow \text{K}$), корреляции почти нет. Последнее связано с отсутствием прямой “конкуренции” между натрием и калием в позиции *A*, иными словами калий может как замещать натрий, так и занимать вакантные позиции. Содержание марганца, присутствующего в качестве постоянной изоморфной примеси, наиболее выдержано в составе магнезиоарфведсонита из дифференцированного и эвдиалитового комплексов, а в минерале из пойкилитовых и вулканогенно-осадочных пород существенно меняется. Содержание фтора также варьирует заметно, приближая в некоторых случаях состав к границе с таковым для магнезиофтороарфведсонита.

Арфведсонит $\text{NaNa}_2(\text{Fe}_4^{2+}\text{Fe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Арфведсонит определяется доминирующим натрием в позиции *A*, двух- и трехвалентным железом в позиции *C*, OH-группами в позиции *W* стандартной формулы амфиболов $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}W_2$. Его статус подтверждался во всех номенклатурах амфиболов (Leake, 1978; Leake et al., 1997; Hawthorne et al., 2012).

Как уже упомянуто, исследователи Ловозерского массива зачастую не делали различий между арфведсонитом и магнезиоарфведсонитом, но среди “ранних” анализов арфведсонитов есть не только магнезиоарфведсонит, но и экерманнит, магнезиофторарфведсонит, фторрихтерит и рихтерит (табл. 1, БД 1121, 1154, 1155, 930, соответственно), а также потенциально возможные амфиболы (табл. 1) – ферроэкерманнит (БД 1156), феррифторнибеит (БД 1118, 934), феррофторэкерманнит (БД 926, 1125), фторарфведсонит (БД 927), ferri-rootname (БД 1119).

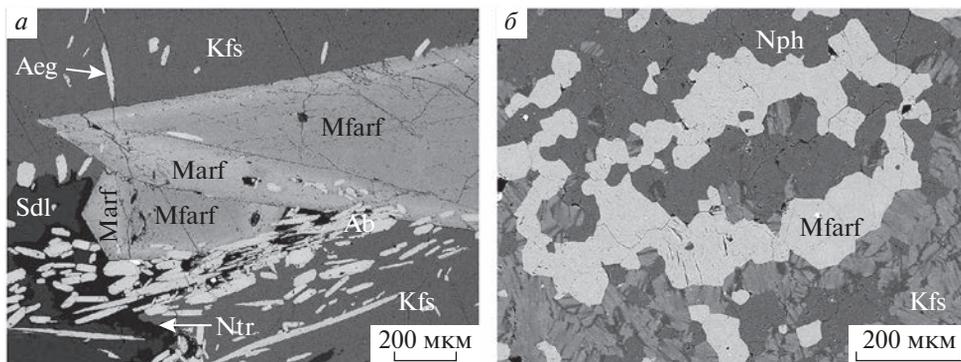


Рис. 4. Морфология магнезиофторарфведсонита в породах Ловозерского щелочного массива. *а* – неоднородные кристаллы амфибола с магнезиофторарфведсонитом во внутренних зонах и магнезиоарфведсонитом во внешних; луюврит, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-169-120; *б* – скопления зерен магнезиофторарфведсонита; амфиоло-нефелино-полевошпатовый роговик, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-121. СЭМ, BSE (обратно-рассеянные электроны) изображения. Mfarf – магнезиофторарфведсонит, Marf – магнезиоарфведсонит, Kfs – калиевый полево шпат, Nph – нефелин, Aeg – эгириин, Sdl – содалит.

Fig. 4. Morphology of magnesio-fluoro-arfvedsonite in rocks of the Lovozero alkaline massif.

Интересно, как менялась во времени оценка распространенности арфведсонита в породах Ловозерского массива. В работе (Семенов, 1972) арфведсонит назван “главным амфиболом массива”, но уже тогда было отмечено обогащение минерала магнием. И.В. Пеков отмечает, что ранее опубликованные анализы “арфведсонита” в большинстве своем относятся к магнезиоарфведсониту, “который, видимо, более распространен в Ловозере, чем собственно арфведсонит” (Пеков, 2001). Часть полученных нами анализов пересчитывается на арфведсонит, но прошел через сито отбора (см. раздел “Материалы и методы исследований”) лишь один анализ амфибола из луюврита эвдиалитового комплекса г. Аллуайв. Поэтому на сегодня мы можем говорить о единственной достоверной нашей находке собственно арфведсонита в Ловозерском массиве (табл. 3).

Морфология и состав арфведсонита в породах Ловозерского массива

В луюврите эвдиалитового комплекса арфведсонит установлен в виде участков неправильной формы в краевой зоне ксеноморфных выделений магнезиоарфведсонита в агрегатах эгирина (рис. 2, б). Высокое содержание магния в составе амфибола приближает его к границе с магнезиоарфведсонитом (табл. 4). Трехвалентное железо в позиции *C* замещается алюминием (подобно замещениям по схеме 4), смещая состав к экерманниту, а натрий в позиции *A* изоморфен с калием, образуя ряд арфведсонит–калийарфведсонит.

Магнезиофторарфведсонит $\text{NaNa}_2(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$

Находка магнезиофторарфведсонита, послужившая голотипным материалом для этого минерального вида, сделана в породах Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Ю. Урал) (Баженов и др., 2000). Этому минеральному виду отвечают многие из ранее опубликованных анализов амфиболов Ловозерского массива (табл. 1, БД 1116, 1124, 1154, 1157, 1158). Нами магнезиофторарфведсонит установлен в урритах

дифференцированного и луавритах эвдиалитового комплексов, а также в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород (табл. 3).

*Характерные черты морфологии магнезиофторарфведсонита
в породах Ловозерского массива*

В дифференцированном комплексе надежные находки магнезиофторарфведсонита представлены включениями в эгирине. В породах эвдиалитового комплекса магнезиофторарфведсонит совместно с магнезиоарфведсонитом образует выделения с разной степенью идиоморфизма – ксеноморфные зерна, идиоморфные призматические и длиннопризматические кристаллы (рис. 4, а).

Самой распространенной морфологией магнезиофторарфведсонита в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород являются ксеноморфные зерна и их скопления (рис. 4, б), а также гипидиоморфные кристаллы в основной массе породы.

Химический состав магнезиофторарфведсонита в породах Ловозерского массива

Наибольшие вариации в составе магнезиофторарфведсонита проявляют видообразующие элементы – железо и магний, а также примеси – кальций и алюминий (табл. 4, Приложение Na-Amp.xlsx). Для магнезиофторарфведсонита проявлены те же схемы изоморфных замещений катионов, что и для магнезиоарфведсонита (Раздел “Магнезиоарфведсонит”, схемы 1–7, рис. 3).

Калийарфведсонит $\text{KNa}_2(\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Калийарфведсонит, как справедливо указывают И.В. Пеков с соавторами (Pekov et al., 2004), можно назвать “старым новым минералом”, поскольку данные об амфиболах, содержащих более 0.5 а. ф. (атомов на формулу) калия в позиции А, публиковались задолго до утверждения калийарфведсонита в качестве самостоятельного минерального вида в 2003 году. Интересно также то, что в публикации, представляющей новый амфибол – калийарфведсонит, охарактеризованы образцы сразу из трех знаменитых крупных щелочных комплексов – Илимаусак (Гренландия), Хибины и Ловозеро (Кольский полуостров, Россия).

Калийарфведсонит получил название согласно принятым КНМНК ММА правилам наименования амфиболов – “арфведсонит”, в котором $\text{K} > \text{Na}$ в позиции А. В остальном он полностью аналогичен арфведсониту: доминирующее двух- и трехвалентное железо в позиции С, ОН-группы в позиции W стандартной формулы амфиболов $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}W_2$.

В Ловозерском массиве калийарфведсонит был найден в пегматите Палитра на г. Кедыквырпах (Pekov et al., 2004). В данной работе мы представляем минерал из ксенолита вулканогенно-осадочных пород на г. Куамдеспакх (табл. 3).

Морфология и химический состав калийарфведсонита в вулканогенно-осадочных породах Ловозерского массива

Минерал установлен в виде ксеноморфных зерен и идиоморфных кристаллов среди выделений виоларита FeNi_2S_4 в межзеренном пространстве породообразующих флогита, рихтерита, феррикатофорита, нефелина и титанита (рис. 5).

В химическом составе калийарфведсонита можно отметить замещение $\text{Fe}^{2+} \leftarrow \text{Mg}$, смещающее состав в сторону калиймагнезиоарфведсонита, а также заметное количество примесного ванадия (табл. 4, электронное приложение, файл Na-Amp.xlsx). Последнее может быть связано со спецификой условий образований калийарфведсонита совместно с “рудными” минералами – виоларитом, бартонитом, ильменитом, из гид-

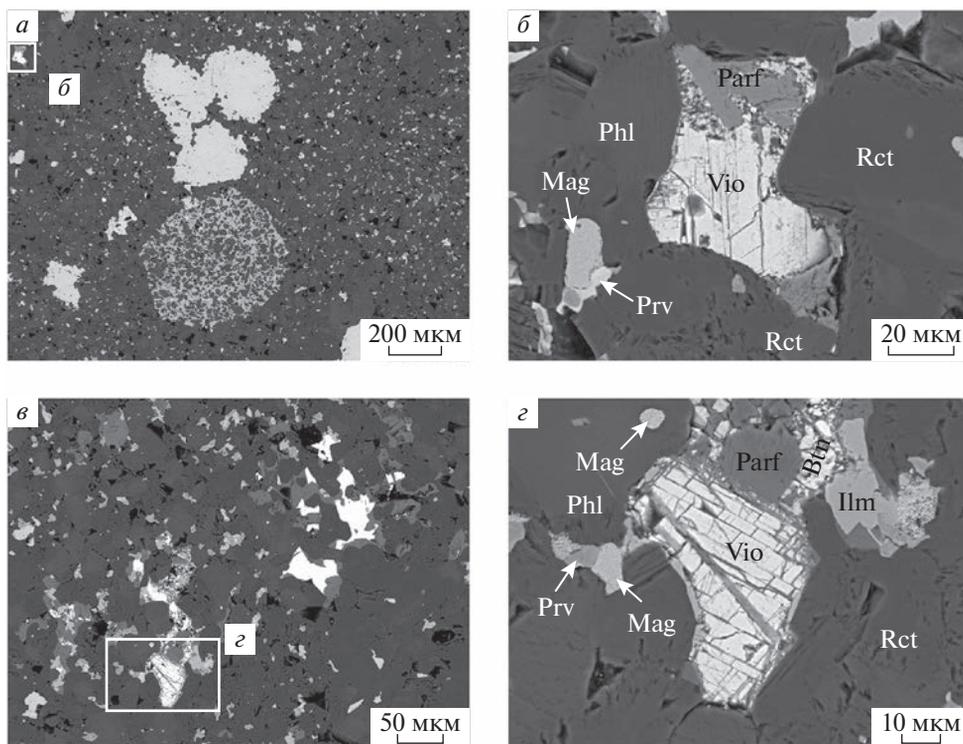


Рис. 5. Морфология калийарфведсонита в породах Ловозерского щелочного массива. *a, б* – идиоморфные призматические кристаллы, *в, г* – ксеноморфные зерна калийарфведсонита в ксенолите фенитизированной вулканогенно-осадочной породы, г. Куамдспахк, обр. ЛВ-152/4. СЭМ, BSE (обратно-рассеянные электроны) изображения. Parf – калийарфведсонит, Vio – виоларит, Rct – рихтерит, Phl – флогопит, Mag – магнетит, Prv – перовскит, Btn – бартонит.

Fig. 5. Morphology of potassic-arfvedsonite in rocks of the Lovozero alkaline massif.

ротермальных растворов, отделившихся от щелочных пород и воздействовавших на ксенолиты пород трапповой формации. На гидротермальный генезис калийарфведсонита в ультраагпаитовых комплексах (Ловозеро, Илимаусак), в отличие от его образования на ранней пегматитовой стадии в богатом калием комплексе Хибин указывали И.В. Пеков с соавторами (Pekov et al., 2004).

Калийарфведсонит из вулканогенно-осадочных пород характеризуется более высоким содержанием калия, железа, и отсутствием фтора по сравнению с таковым для минерала из пегматита Палитра (Pekov et al., 2004), что еще больше приближает его к идеальной формуле конечного члена (табл. 4).

Не подтвержденные нашими исследованиями натриевые амфиболы

В данной работе нами упомянуты ранее опубликованные химические составы, которые согласно действующей номенклатуре (Hawthorne et al., 2012) отвечают калий-магнезиоарфведсониту, калиймагнезиофторарфведсониту и экерманниту (табл. 1, электронное приложение, файл Литер_данные.xlsx). Эти анализы выполнены методами мокрой химии, что, с учетом описанных особенностей амфиболов, а именно внут-

Таблица 5. Распространенность Na-Ca-амфиболов в породах Ловозерского массива
Table 5. Abundance of sodium-calcium amphiboles in rocks of the Lovozero massif

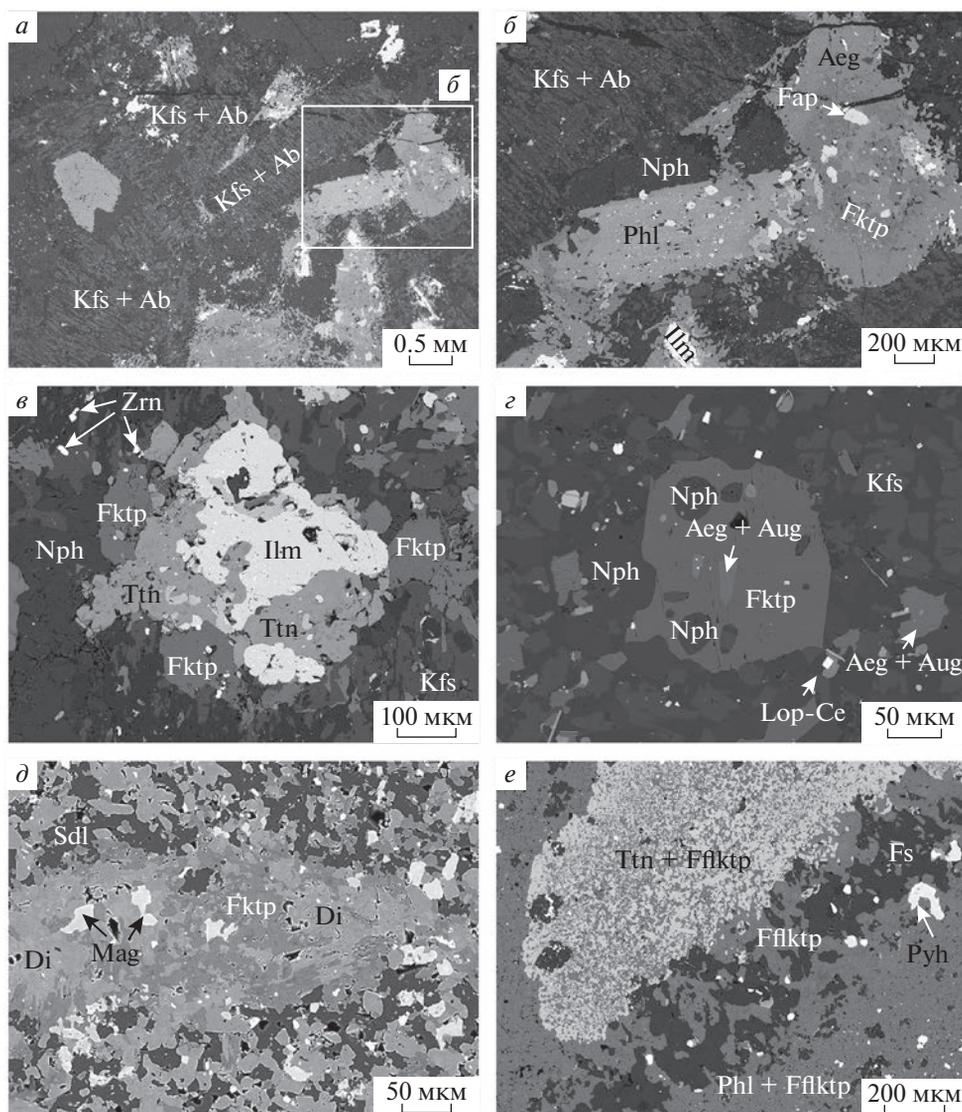
Минерал	Пойкилитовый комплекс	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород
Феррикатофорит	– неравномернозернистый нефелиновый сиенит;	– базальтовый туф; – метасоматически измененная вулканогенно-осадочная порода; – фенитизированная вулканогенно-осадочная порода;
Феррифторкатофорит	–	– фенитизированный базальтовый туф;
Рихтерит	–	– базальтовый туф; – фенитизированный базальт; – фенит
Фторрихтерит	– пойкилитовый фельдшпатоидный сиенит	–

рифазовой (химической) и фазовой (включения других минералов) неоднородности индивидов, требует подтверждения их корректности. Необходимость такого подтверждения, тем не менее, не опровергает эти результаты, поэтому данные виды включены в кадастровую таблицу амфиболов Ловозерского массива (табл. 9, см. раздел “Обсуждение результатов”). Составы, формально отвечающие калиймагнезиоарфведсониту и экерманниту, были получены и нами, но эти анализы имеют существенные отклонения от принятых критериев достоверности данных (см. раздел “Материалы и методы исследования”). Амфибола, соответствующих калиймагнезиофторарфведсониту, нами установлено не было.

Кроме того, шесть ранее опубликованных анализов отвечают гипотетическим, не утвержденным ИМА видам: “фторарфведсониту”, “феррозекерманниту”, “феррофторэкерманниту” и “феррифторнибеиту” (табл. 1, электронное приложение, файл Литер_данные.xlsx), которые мы также включили в кадастровую таблицу (табл. 9, см. раздел “Обсуждение результатов”).

Рис. 6. Морфология феррикатофорита и феррифторкатофорита в породах Ловозерского щелочного массива. *a, б* – ксеноморфные выделения феррикатофорита в агрегатах темноцветных минералов, заполняющих интерстиции лейст альбитизированного КПШ; неравномернозернистый нефелиновый сиенит, пойкилитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-157/92; *в* – идиоморфные кристаллы феррикатофорита в агрегате темноцветных минералов; неравномернозернистый нефелиновый сиенит, пойкилитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-180/75; *г* – гипидиоморфный кристалл феррикатофорита; ксенолит метасоматически измененной вулканогенно-осадочной породы, г. Куамдеспакх, обр. ЛВ-137/61 (аналитик А.В. Базай); *д* – участки феррикатофорита в диопсиде; фенитизированная вулканогенно-осадочная порода, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-125; *е* – феррифторкатофорит в ксенолите базальтового туфа, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-183/2. СЭМ, BSE (обратно-рассеянные электроны) изображения. Fktr – феррикатофорит, Fflktr – феррифторкатофорит, Kfs – калиевый полевой шпат, Nph – нефелин, Phl – флогопит, Ntr – натролит, Eud – эвдиалит, Aeg – эгирин, Ab – альбит, Fap – фторапатит, Sdl – содалит, Aeg-Aug – эгирин-авгит, Di – диопсид, Vhn – вишневит, Ttn – титанит, Lop-Ce – лопарит-(Ce), Fs – ферросилит, Ilm – ильменит, Zrn – циркон, Mag – магнетит, Zeo – минералы группы цеолитов, Pyh – пирротин.

Fig. 6. Morphology of ferri-katophorite and ferri-fluoro-katophorite in rocks of the Lovozero alkaline massif.



НАТРИЙ-КАЛЬЦИЕВЫЕ АМФИБОЛЫ

В Ловозерском массиве установлены следующие натрий-кальциевые амфиболы: феррикатафорит, феррифторкатафорит, рихтерит и фторрихтерит (табл. 5). Амфиболы рассматриваемой группы обнаружены в породах пойкилитового комплекса и метасоматически измененных вулканогенно-осадочных породах, сохранившихся в виде ксенолитов кровли массива.

Феррикатафорит $\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Согласно действующим правилам выделения минеральных видов в группе амфиболов, феррикатафорит определяется по доминированию Na в позиции A, Mg среди

двухвалентных катионов и Fe^{3+} среди трехвалентных катионов в группе C, (ОН)-групп в позиции W стандартной формулы $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}W_2$ (Hawthorne et al., 2012). В номенклатурах 1978 (Leake, 1978) и 1997 (Leake et al., 1997) годов минерал именовался “магнезиоферрикатафоритом” и “магнезиоокатафоритом” соответственно (табл. 2), что привело к путанице. Среди ранее опубликованных данных по амфиболам Ловозерского массива химических составов, отвечающих современной формуле феррикатафорита, нет (табл. 1). Однако в составе пород пойкилитового комплекса амфибол под таким названием на основе результатов электронно-зондового анализа указан в ассоциации при описании петрогенезиса эвдиалитового комплекса г. Аллуйв (Mikhailova et al., 2019).

Авторами установлено довольно много проявлений феррикатафорита, но в ограниченном круге пород (табл. 5).

Характерные черты морфологии феррикатафорита в породах Ловозерского массива

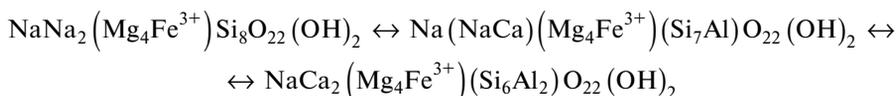
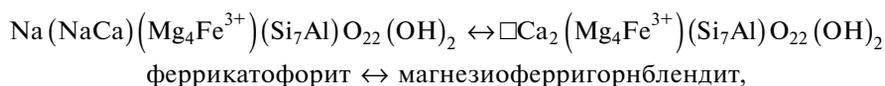
В породах пойкилитового комплекса феррикатафорит обычен в составе зернистых агрегатов совместно с флогопитом, эгирином, титанитом, ильменитом, лопаритом-(Се), которые заполняют интерстиции крупных лейст пертитового полевого шпата (рис. 6, а, б). В подобных агрегатах феррикатафорит, как правило, представлен ксеноморфными зернами, реже его кристаллы приобретают идиоморфные ограничения (рис. 6, в). Наблюдался феррикатафорит также в виде отдельных ксеноморфных зерен с включениями титанита и фторапатита. Подобные зерна бывают с каймами эгирина или флогопита. Также зерна феррикатафорита пойкилитового строения (включения титанита, фторапатита, ильменита) окружают ксеноморфные зерна титанита и ильменита.

В ксенолитах вулканогенно-осадочных пород для феррикатафорита характерны ксеноморфные зерна и гипидиоморфные кристаллы в основной массе породы (рис. 6, з). Индивиды могут иметь пойкилитовое строение (включения эгирина-авгита, нефелина) и проявлять неоднородность химического состава вплоть до участков, соответствующих рихтериту. Феррикатафорит в виде участков неправильной формы установлен и в диопсиде (рис. 6, д).

Химический состав феррикатафорита в породах Ловозерского массива

Химический состав феррикатафорита (табл. 6) варьирует за счет изоморфных замещений, связывающих феррикатафорит как с членами собственной группы (ферроферрикатафорит, феррокатафорит), так и с кальциевыми (магнезиоферригорнблендит, эденит, магнезиогастингсит) и натриевыми амфиболами (арфведсонит, магнезиоарфведсонит, гипотетический “ферринибейт”) (электронное приложение, файл Na-Ca-Amp.xlsx).

Наиболее сильные корреляции имеют схемы изоморфизма, приведенные ниже и на соответствующих диаграммах рис. 7:



магнезиоарфведсонит ↔ феррикатафорит ↔ магнезиогастингсит,

Таблица 6. Химический состав (мас. %) минералов подгруппы Na-Ca-амфиболов из пород Ловозерского массива**Table 6.** Chemical composition (wt %) of sodium-calcium amphiboles in rocks of the Lovozero massif

Компонент	Минерал											
	Fktp						Ffktp	Rct			Flrct	
	Комплексы пород Ловозерского массива											
	пойки-лит.	вулк.-осад.					вулк.-осад.	вулк.-осад.			пойки-лит.	
	Номер анализа в базе данных (БД)											
	1143	169	357	429	1203	1204	142	168	370	569	52	
SiO ₂	49.25	49.96	47.54	50.86	48.71	48.35	50.12	52.94	51.86	53.13	54.83	
TiO ₂	1.68	0.92	2.23	0.88	2.14	2.20	1.10	0.43	1.15	0.63	0.51	
ZrO ₂	—	—	0.51	—	—	—	—	—	—	—	—	
Al ₂ O ₃	3.78	4.45	4.14	3.02	5.87	5.96	4.68	2.29	2.41	1.30	1.31	
V ₂ O ₃	—	0.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Cr ₂ O ₃	—	0.11	—	0.10	0.04	0.03	—	—	—	—	—	
Fe ₂ O ₃ расч	9.23	4.92	8.25	9.33	5.13	5.16	5.97	1.54	1.91	3.92	2.28	
FeO расч	11.40	7.37	12.84	4.67	4.21	4.34	5.88	8.96	10.75	6.90	7.35	
MnO	1.21	0.32	1.76	0.68	0.20	0.17	0.35	0.37	1.62	1.41	0.95	
ZnO	—	—	0.15	—	—	—	—	—	—	—	—	
MgO	9.61	15.13	8.48	15.19	16.87	16.69	15.69	16.61	13.68	16.14	16.08	
CaO	3.60	7.11	4.40	5.40	9.49	9.60	6.83	5.93	5.88	4.97	3.78	
Na ₂ O	7.41	5.97	6.78	6.08	4.64	4.53	6.62	6.74	6.14	6.84	7.51	
K ₂ O	1.52	0.54	1.44	1.29	0.67	0.66	0.59	0.50	1.41	1.47	1.70	
H ₂ O ⁺ расч	1.31	1.13	1.53	2.02	1.24	1.22	0.73	1.12	1.29	1.00	0.91	
F	0.66	1.50	—	—	0.74	0.74	2.30	1.78	1.00	2.00	2.20	
—O=F ₂	0.28	0.63	0.00	0.00	0.31	0.31	0.97	0.75	0.42	0.84	0.93	
Сумма	100.38	98.88	100.05	99.52	99.64	99.34	99.89	98.46	98.68	98.87	98.48	

Формульные коэффициенты атомов, рассчитанные на указанной основе, и их распределение в стандартной формуле $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}W_2$
число катионов

Основа расчета*	16	13	16	13	13	13	16	16	16	16	16
Si	7.37	7.32	7.23	7.38	7.04	7.02	7.26	7.72	7.70	7.76	7.97
Al	0.63	0.68	0.74	0.52	0.96	0.98	0.74	0.28	0.30	0.22	0.03
Ti	—	—	0.03	0.10	—	—	—	—	—	0.02	—
Сумма T	8.00										
Ti	0.19	0.10	0.23	—	0.23	0.24	0.12	0.05	0.13	0.05	0.06
Zr	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	0.03	0.09	—	—	0.04	0.04	0.06	0.11	0.12	—	0.19

Таблица 6. Окончание

Компо- нент	Минерал										
	Fktp					Ffktp	Rct			Frct	
	Комплексы пород Ловозерского массива										
	пойки- лит.	вулк.-осад.					вулк.- осад.	вулк.-осад.			пойки- лит.
	Номер анализа в базе данных (БД)										
	1143	169	357	429	1203	1204	142	168	370	569	52
V	–	0.01	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cr	–	0.01	–	0.01	0.01	–	–	–	–	–	–
Fe ³⁺	1.04	0.54	0.94	1.01	0.56	0.56	0.65	0.17	0.21	0.43	0.25
Zn	–	–	0.02	–	–	–	–	–	–	–	–
Mn ²⁺	0.15	0.04	0.22	0.08	0.02	0.02	0.04	–	0.17	0.16	0.12
Fe ²⁺	1.43	0.90	1.63	0.57	0.51	0.53	0.71	1.06	1.34	0.84	0.89
Mg	2.14	3.30	1.92	3.29	3.63	3.61	3.39	3.61	3.03	3.51	3.48
Сумма С	4.98	4.99	5.00	4.96	5.00	5.00	4.97	5.00	5.00	4.99	4.99
Mn ²⁺	–	–	0.01	–	–	–	–	0.05	0.03	0.01	–
Fe ²⁺	–	–	–	–	–	–	–	0.03	–	–	–
Ca	0.58	1.12	0.72	0.84	1.47	1.49	1.06	0.93	0.94	0.78	0.59
Na	1.42	0.88	1.28	1.16	0.53	0.51	0.94	1.00	1.04	1.21	1.41
Сумма В	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.01	2.00	2.00
Na	0.73	0.81	0.72	0.55	0.77	0.77	0.92	0.91	0.73	0.73	0.71
K	0.29	0.10	0.28	0.24	0.12	0.12	0.11	0.09	0.27	0.27	0.32
Сумма А	1.02	0.91	1.00	0.79	0.89	0.89	1.03	1.00	1.00	1.00	1.03
ОН	1.31	1.10	1.55	1.96	1.20	1.18	0.71	1.09	1.27	0.98	0.88
F	0.31	0.70	–	–	0.34	0.34	1.05	0.82	0.47	0.92	1.01
O	0.38	0.20	0.45	0.04	0.47	0.48	0.24	0.09	0.26	0.10	0.11
Сумма W	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

Примечание. Fktp – феррикатафорит, Ffktp – феррифторкатафорит, Rct – рихтерит, Frct – фторрихтерит. * Для всех анализов расчет к.ф. выполнен по алгоритму (Лосock, 2014). См. электронное приложение, файл Na-Ca-Amp.xlsx.

Анализы:

1143 – неравномернозернистый нефелиновый сиенит, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-157/92. AZtec.

169 – ксенолит базальтового туфа, Тройная долина, г. Куйвчорр. Обр. ЛВ-183/2. AZtec.

357 – ксенолит метасоматически измененной вулканогенно-осадочной породы, г. Куамдеспакх. Обр. ЛВ-137/61. AZtec.

429 – ксенолит базальтового туфа, г. Куйвчорр. Обр. ЛВ-180Б. ЕРМА.

1203, 1204 – фенитизированная вулканогенно-осадочная порода, г. Куйвчорр. Обр. ЛВ-125. AZtec.

142 – фенитизированный базальтовый туф, Тройная долина, г. Куйвчорр. Обр. ЛВ-183/2. ЕРМА.

168 – ксенолит базальтового туфа, Тройная долина, г. Куйвчорр. Обр. ЛВ-183/2. AZtec.

370 – фенитизированный базальт, г. Куамдеспакх. Обр. ЛВ-137/9. ЕРМА.

569 – фенит, г. Сенгисчорр. Обр. ЛВ-184А. ЕРМА.

52 – пойкилитовый вишневитовый сиенит, г. Сенгисчорр. Обр. ЛВ-381. ЕРМА.

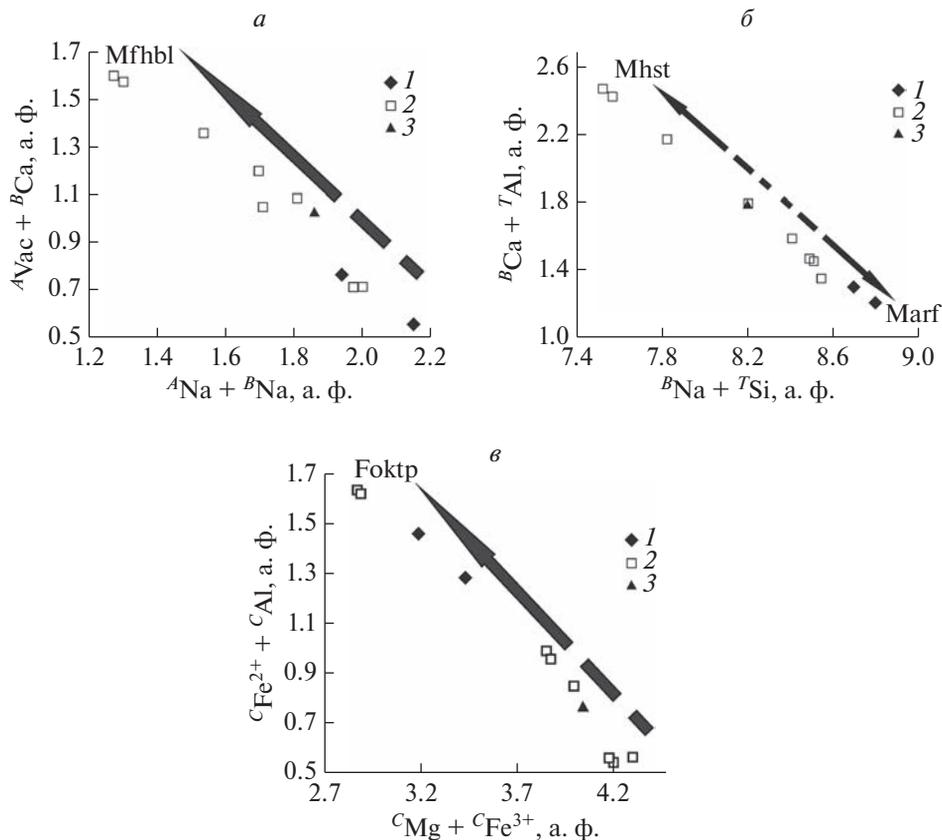
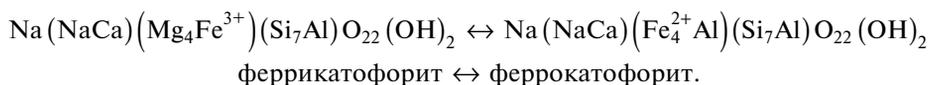
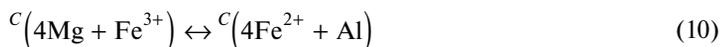


Рис. 7. Корреляция элементов при изоморфных замещениях в феррикатофорите и феррифторкатофорите. 1 – феррикатофорит из пород пойкилитового комплекса, 2 – феррикатофорит из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород, 3 – феррифторкатофорит из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород. Mfhbl – магнезиоферригорнблендит. Mhst – магнезиогастингсит, Foktp – феррокатофорит, Marf – магнезиоарфведсонит.

Fig. 7. Correlation of elements involved in isomorphous substitution for the ferri-katophorite and ferri-fluoro-katophorite.



Интересно, что первая часть схемы (9) реализуется также для составов магнезиоарфведсонита (см. схему (1) в разделе “Натриевые амфиболы”), и также с высоким коэффициентом корреляции. Таким образом, она является сквозной для минеральных видов из всех трех подгрупп амфиболов, обнаруженных в Ловозерском массиве, причем два из этих трех видов относятся к распространенным.

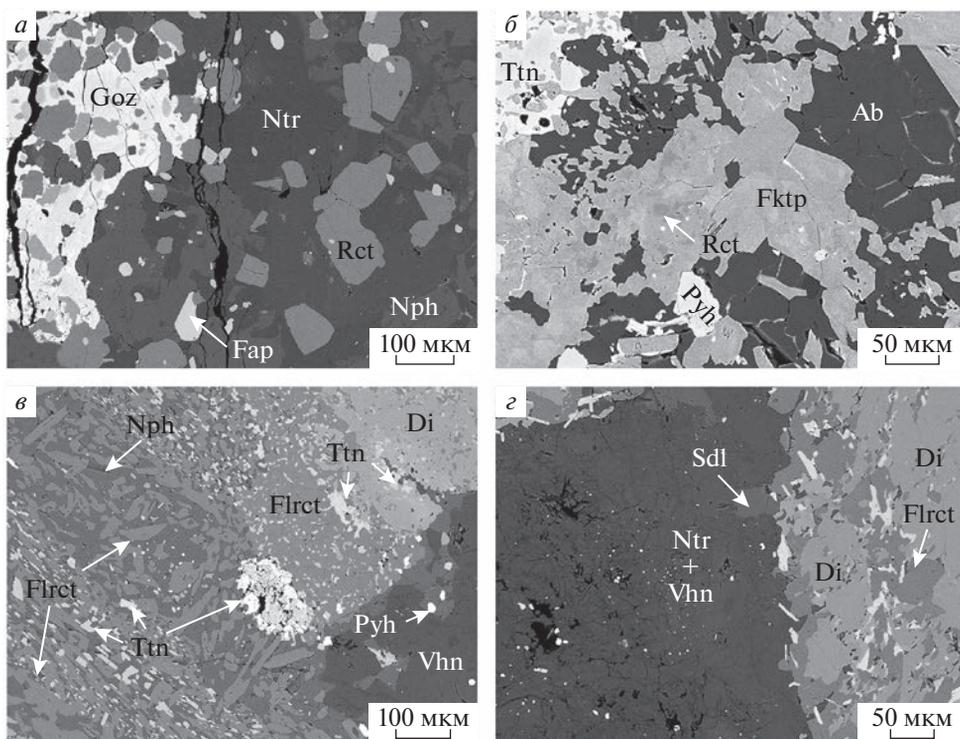


Рис. 8. Морфология рихтерита и фторрихтерита в породах Ловозерского щелочного массива. *а* – гипидиоморфные кристаллы рихтерита и их сростки; фенит, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-184А. *б* – участки рихтерита в неоднородных зернах феррикатофорита; ксенолит базальтового туфа, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-183/2. *в* – кристаллы фторрихтерита, *з* – включения и кайма фторрихтерита на кристалле диопсида; пойкилитовый вишневитовый сиенит, пойкилитовый комплекс, г. Сенгисчорр, обр. ЛВ-381. СЭМ, BSE (обратно-рассеянные электроны) изображения. Rct – рихтерит, Flrct – фторрихтерит, Fktp – феррикатофорит, Nph – нефелин, Ntr – натролит, Ab – альбит, Fap – фторапатит, Göz – гетценит, Sdl – содалит, Di – диопсид, Vhn – вишневит, Ttn – титанит, Pyh – пирротин.

Fig. 8. Morphology of richterite and fluoro-richterite in rocks of the Lovozero alkaline massif.

Феррифторкатофорит $\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}\text{F}_2$

Феррифторкатофорит был выделен как новый минеральный вид в 2015 г. Р. Оберти с соавторами (Hålenius et al., 2016). Название минерала дано в соответствии с утвержденной ММА схемой наименования амфиболов (Hawthorne et al., 2012). Детальное описание находки феррифторкатофорита из жильных/дайковых тел, внедрившихся в амфиболиты и мраморы комплекса Гламорган (Glamorgan), Онтарио, Канада, приведено в работе (Oberti et al., 2019). Месторождение в Онтарио оставалось, по сути, единственным достоверным местонахождением феррифторкатофорита.

В Ловозерском массиве феррифторкатофорит установлен нами в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород (табл. 5).

Морфология и состав феррифторкатофорита в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород Ловозерского массива

Феррифторкатофорит совместно с флогопитом образует тонкозернистые (10–15 мкм) агрегаты в основной массе породы. Более крупнозернистые выделения амфибола слагают прожилки. В виде мелких (10–15 мкм) ксеноморфных включений, тоже с флогопитом, феррифторкатофорит присутствует в пойкилитовых зернах титанита. Описанные формы нахождения феррифторкатофорита показаны на рис. 6, е. Химический состав феррифторкатофорита находится в пределах вариаций состава феррикатофорита по всем определявшимся элементам, кроме, конечно, фтора (табл. 6, электронное приложение, файл Na-Ca-Amp.xlsx). Фигуративная точка феррифторкатофорита располагается вблизи линий трендов изменения состава феррикатофорита при изоморфных замещениях (рис. 7, электронное приложение, файл Na-Ca-Amp.xlsx).

Рихтерит $\text{Na}(\text{NaCa})\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

В отличие от феррикатофорита, рихтерит сохранял свое название и формулу в номенклатурах разных лет. В Ловозерском массиве рихтерит (по данным электронно-зондового анализа) указывался в составе оторочек вокруг реликтов авгита в неравномернозернистых/пойкилитовых фельдшпатоидных сиенитах (Mikhailova et al., 2019), а также как один из минералов, образующихся при фенитизации и ороговикования ксенолитов оливиновых базальтов (Корчак и др., 2011). Нами рихтерит установлен в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород (табл. 5).

Морфология и состав рихтерита в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород Ловозерского массива

Рихтерит в вулканогенно-осадочных породах представлен ксеноморфными зернами, гипидиоморфными кристаллами и их сростками (рис. 8, а). Также он установлен в виде участков неправильной формы в неоднородных индивидах феррикатофорита (рис. 8, б).

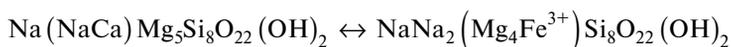
В составе рихтерита существенно варьируют содержания титана, алюминия, железа, калия и фтора (табл. 6, электронное приложение, файл Na-Ca-Amp.xlsx), что вполне закономерно, поскольку образование минерала происходило в различных обстановках — за счет разного исходного материала вулканогенно-осадочных пород, а также различной интенсивности воздействия метасоматизирующих растворов.

Магний в рихтерите замещается железом:

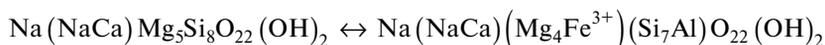


рихтерит \leftrightarrow феррорихтерит,

в некоторых случаях высока доля ${}^C\text{Fe}^{3+}$ за счет изоморфизма в сторону магнезиоарфведсонита и феррикатофорита:



рихтерит \leftrightarrow магнезиоарфведсонит,

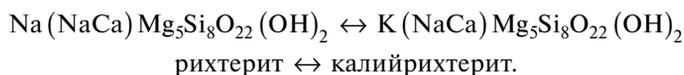


рихтерит \leftrightarrow феррикатофорит.

Таблица 7. Распространенность Са-амфиболов в породах Ловозерского массива
Table 7. Abundance of calcium amphiboles in rocks of the Lovozero massif

Минерал	Вулканогенно-осадочные породы
Актинолит	– метакварцит; – слабо фенитизированная вулканогенно-осадочная порода; – метаморфизованная вулканогенно-осадочная порода; – базальт; – метабазаьт; – измененный оливинный базальт; – оливинный базальт; – оливинный метабазаьт
Эденит	– ультраосновная порода/фениты; – базальт; – оливинный базальт; – вулканогенно-осадочная порода
Паргасит	– фенит
Гастингсит	– фенитизированный аннито-анортотлазовый роговик
Магнезиогастингсит	– фенитизированный аннито-анортотлазовый роговик
Магнезиоферри-горн-блендит	– метабазаьт; – оливинный метабазаьт; – туффит; – базальт; – измененный оливинный базальт; – контакт осадочных горных пород с гравеллитом; – слабофенитизированная вулканогенно-осадочная порода

Содержание калия варьирует значительно, смещая составы к калийрихтериту:



Фторрихтерит $\text{Na}(\text{NaCa})\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$

Фторрихтерит, открытый в Ильмено-Вишневогорском щелочном комплексе Урала (Баженов и др., 1993), остается довольно редким амфиболом. По составу фторрихтерит сходен с рихтеритом, отличаясь доминированием фтора в анионной группе *W* стандартной формулы амфиболов.

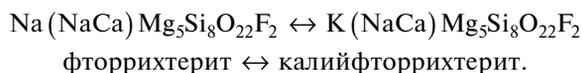
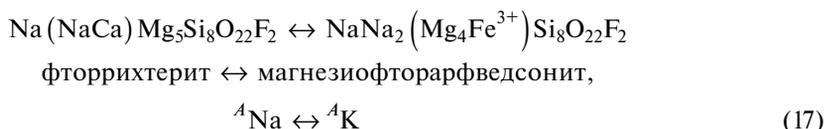
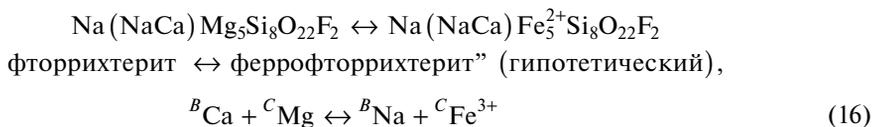
В Ловозерском массиве фторрихтериту соответствуют два из опубликованных ранее анализов амфиболов (Герасимовский и др., 1966; табл. 1, БД 1155, 932). Нами фторрихтерит установлен в пойкилитовом фельдшпатоидном сиените пойкилитового комплекса (табл. 5), что расширяет круг пород Ловозерского массива, содержащих рассматриваемый минерал: амфиболовый луюврит (Герасимовский и др., 1966) и пойкилитовый сиенит (наши данные).

Морфология и состав фторрихтерита в породах пойкилитового комплекса Ловозерского массива

Фторрихтерит представлен скоплениями гипидиоморфных и идиоморфных кристаллов, интерстиции в которых заполнены нефелином и титанитом, а также более крупными ксеноморфными индивидами с многочисленными вростками титанита

(рис. 8, в). Фторрихтерит установлен также в виде включений в краевой зоне и внешней каймы крупного кристалла диопсида (рис. 8, г).

Для фторрихтерита характерно довольно высокое содержание железа, входящего при изовалентных (схема (15)) и гетеровалентных (схема (16)) замещениях, а также калия, заполняющего практически треть позиции *A* (табл. 6, электронное приложение, файл Na-Ca-Amp.xlsx):



Для ловозерского фторрихтерита наблюдается пониженное содержание кальция в соответствии со схемой изоморфизма (16), вплотную приближая состав к границе с магнезиофторарфведсонитом. Содержание другого видообразующего элемента, кремния, напротив, высокое, демонстрирует почти полное заполнение тетраэдрической позиции с крайне незначительным вхождением в нее алюминия (табл. 6).

КАЛЬЦИЕВЫЕ АМФИБОЛЫ

Актинолит $\square\text{Ca}_2(\text{Mg}_{4.5-2.5}\text{Fe}_{0.5-2.5}^{2+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Актинолит является промежуточным членом ряда тремолит $\square\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ – ферроактинолит $\square\text{Ca}_2\text{Fe}_5^{2+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, но традиционно сохраняется в номенклатурах амфиболов в силу своей петрологической значимости и укоренившегося положения в геологической литературе. Согласно действующей номенклатуре амфиболов (Nawthorne et al., 2012), химические составы актинолита находятся в интервале от $\square\text{Ca}_2\text{Mg}_{<4.5}\text{Fe}_{>0.5}^{2+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ до $\square\text{Ca}_2\text{Mg}_{2.5}\text{Fe}_{2.5}^{2+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$.

Присутствие актинолита, по данным электронно-зондового анализа, в ксенолитах пород трапповой формации в Ловозерском массиве указано в работе (Корчак и др., 2011). Нами актинолит также установлен исключительно в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород (табл. 7).

Характерные черты морфологии актинолита в породах Ловозерского массива

Актинолит обычен в виде ксеноморфных зерен и гипидиоморфных кристаллов, часто находящихся в тесной пространственной связи с флогопитом, диопсидом, эгирином, магнезиоферригорнблендитом (рис. 9, а). Индивиды актинолита могут содержать многочисленные включения альбита, ильменита, диопсида, вплоть до появления пойкилитового строения (рис. 9, б). В неоднородных выделениях амфибола химические анализы центральных частей варьируют в пределах составов актинолита, а краевые зоны близки к границе с ферропаргаситом (рис. 9, в). Помимо самостоятельных индивидов актинолит установлен в виде участков неправильной формы в неоднородных зернах эденита, во внешних зонах кристаллов диопсида, образуя на последнем и

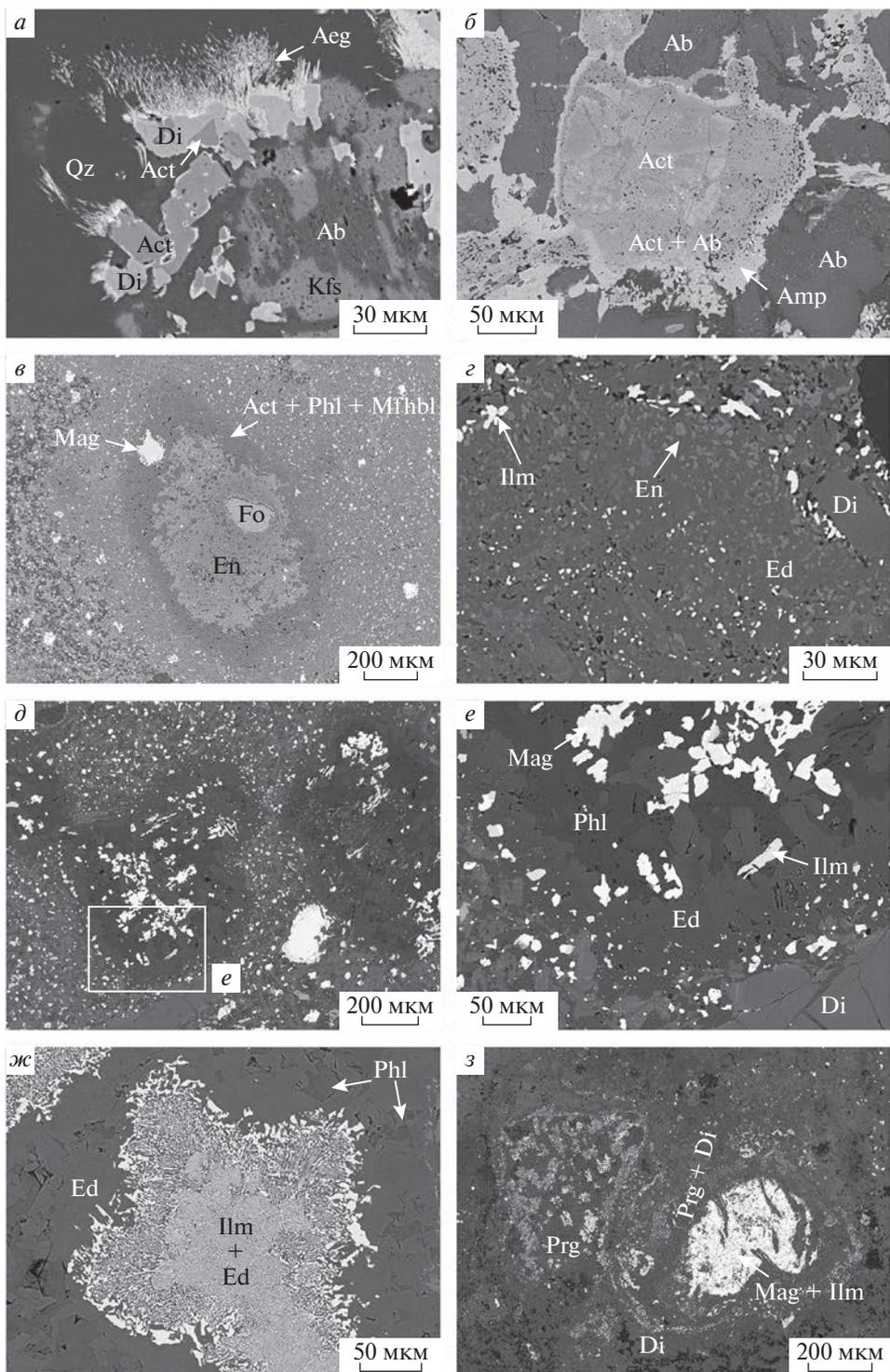


Рис. 9. Морфология актинолита, эденита и паргасита в породах Ловозерского массива. *a* – гипидиоморфные кристаллы актинолита и его ксеноморфные зерна в диопсиде; метакварцит, г. Киткньюн, обр. ЛВ-01-51 П; *b* – ксеноморфные зерна актинолита с внутрифазовой (химической) и фазовой (включения альбита в зонах пойкилитового строения) неоднородностью, обрастающие каймами амфибола близкого к ферропаргаситу; метаморфизованная вулканогенно-осадочная порода, г. Страшемспахк, обр. ЛВ-01-35; *в* – актинолит в псевдоморфозах по форстериту, измененный оливиновый базальт, г. Сэлсурт, обр. ЛВ-01-5; *г* – тонкозернистый агрегат эденита (темно-серый) и энстатита (светло-серый); базальт, г. Куамдеспакх, обр. ЛВ-137/5; *д, e* – кайма эденита вокруг флогопит-магнетит-ильменитового агрегата, *ж* – ильменит-эденитовый симплектит в кайме эденита; оливиновый базальт, г. Сэлсурт, обр. ЛВ-01-28; *з* – ксеноморфные зерна паргасита и агрегаты с диопсидом вокруг крупных зерен магнетит-ильменитового распада; фенит, г. Сэлсурт, обр. ЛВ-01-1Б. СЭМ, BSE (обратно-рассеянные электроны) изображения. Act – актинолит, Ed – эденит, Prg – паргасит, Di – диопсид, En – энстатит, Fo – форстерит, Ab – альбит, Phl – флогопит, Aeg – эгирин, Ilm – ильменит, Mag – магнетит, Qz – кварц, Amp – амфибол, близкий к ферропаргаситу.

Fig. 9. Morphology of actinolite, edenite and pargasite in rocks of the Lovozero massif.

каймы обрастания. Очень тонкими сростаниями актинолита с флогопитом и магнезиоферригорнблендитом образованы внешние каймы псевдоморфоз замещения форстерита (рис. 9, *в*).

Химический состав актинолита в породах Ловозерского массива

Химический состав актинолита из пород Ловозерского массива почти полностью перекрывает теоретический интервал содержания определяющих вид элементов: $C_{Fe^{2+}} = 0.66–1.86$ а. ф., $C_{Mg} = 2.64–4.18$ а. ф. (электронное приложение, файл Ca-Amp.xlsx). Наибольший изоморфизм актинолита проявлен в сторону “роговых обра-

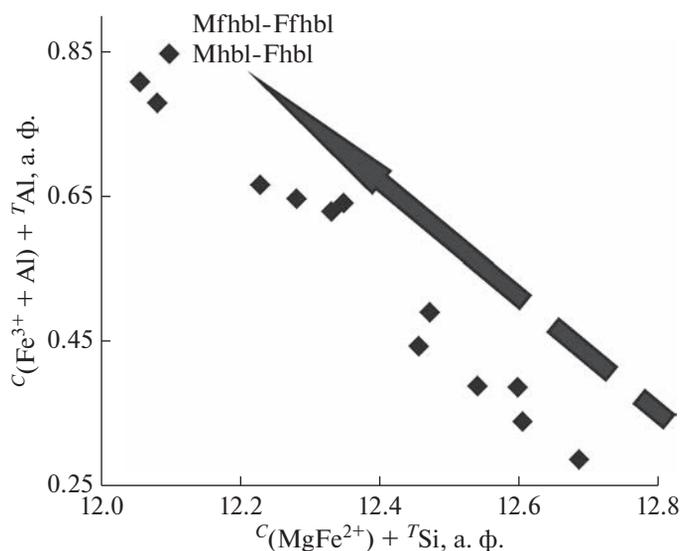


Рис. 10. Корреляция элементов при многокомпонентном изоморфизме в актинолите. Mhbl – магнезиогорнблендит, Ffhbl – ферроферригорнблендит, Mhbl – магнезиогорнблендит, Fhbl – феррогорнблендит.

Fig. 10. Correlation of elements in isomorphous replacements for actinolite.

Таблица 8. Химический состав (мас. %) минералов подгруппы Са-амфиболов из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород Ловозерского массива
Table 8. Chemical composition (wt %) of calcium amphiboles from xenoliths of volcanoclastic rocks in Lovozero alkaline massif

Компо- нент	Минерал												
	Act			Ed				Prg	Hst	Mhst	Mfhbl		
	Номер анализа в базе данных (БД)												
	210	267	1075	115	128	238	262	117	332	333	281	534	1174
SiO ₂	54.42	51.47	56.06	46.05	53.09	51.96	48.79	38.97	39.78	40.60	52.40	51.79	49.86
TiO ₂	0.11	0.23	0.08	2.00	1.55	1.87	1.16	0.65	2.37	0.85	0.65	0.85	0.28
Al ₂ O ₃	1.79	3.95	1.73	6.16	3.36	4.59	6.46	20.15	10.74	11.03	3.61	4.18	5.47
V ₂ O ₃	0.08	—	—	—	—	—	—	0.09	—	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	0.14	0.05	—	0.11	—	—	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃ расч	3.08	1.41	—	1.63	0.00	—	0.28	—	5.98	4.83	5.10	7.46	6.75
FeO расч	7.83	15.01	6.21	13.33	4.91	3.97	13.61	8.22	13.35	13.38	2.85	—	4.93
Mn ₂ O ₃ расч	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.28	—
MnO	0.15	0.24	0.23	0.13	0.09	0.09	0.13	0.13	2.16	1.91	0.18	—	0.17
NiO	—	—	0.17	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—	0.06
MgO	17.31	11.97	19.98	15.22	21.07	22.27	14.50	—	7.36	8.82	18.53	19.87	16.20
CaO	11.68	11.88	11.50	11.09	11.37	11.13	11.45	12.30	11.07	11.38	11.65	11.37	11.27
Na ₂ O	1.15	0.44	1.23	2.87	2.45	2.84	2.09	2.81	2.68	2.58	0.72	1.65	1.43
K ₂ O	0.11	0.28	0.06	0.30	0.15	0.05	0.21	0.93	1.23	1.37	0.41	0.04	0.30
H ₂ O ⁺ расч	2.09	1.98	2.12	1.91	1.78	1.73	1.80	1.88	1.16	1.41	1.95	2.06	2.01
F	—	—	—	—	0.00	—	—	—	0.45	0.71	—	—	—
—O=F ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.30	0.00	0.00	0.00
Сумма	99.80	98.86	99.37	100.83	99.87	100.57	100.59	98.25	98.14	98.57	98.05	99.55	98.73

Формульные коэффициенты атомов, рассчитанные на указанной основе, и их распределение в стандартной формуле $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}W_2$

Основа расчета*	число катионов												
	13	13	15	15	16	16	15	16	13	13	15	15	13
Si	7.73	7.61	7.86	6.77	7.46	7.25	7.11	5.76	6.25	6.30	7.48	7.26	7.20
Al	0.27	0.39	0.14	1.07	0.54	0.75	0.89	2.24	1.75	1.70	0.52	0.69	0.80
Ti	—	—	—	0.16	—	—	—	—	—	—	—	0.05	—
Сумма T	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Ti	0.01	0.03	0.01	0.06	0.16	0.20	0.13	0.07	0.28	0.10	0.07	0.04	0.03
Al	0.03	0.30	0.14	—	0.02	0.01	0.22	1.26	0.24	0.31	0.09	—	0.13
V	0.01	—	—	—	—	—	—	0.01	—	—	—	—	—
Cr	—	—	—	0.02	0.01	—	0.01	—	—	—	—	—	—
Mn ³⁺	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	—
Fe ³⁺	0.33	0.16	—	0.18	—	—	0.03	—	0.71	0.56	0.55	0.79	0.73
Ni	—	—	0.02	—	—	0.01	—	—	—	—	—	—	0.01
Mn ²⁺	0.02	0.03	—	—	—	—	—	—	0.29	0.25	—	—	0.02

Таблица 8. Окончание

Компонент	Минерал												
	Act			Ed				Prg	Hst	Mhst	Mfhbl		
	Номер анализа в базе данных (БД)												
	210	267	1075	115	128	238	262	117	332	333	281	534	1174
Fe ²⁺	0.93	1.86	0.66	1.41	0.39	0.16	1.46	0.98	1.76	1.74	0.34	—	0.60
Mg	3.67	2.64	4.18	3.34	4.42	4.63	3.15	2.67	1.73	2.04	3.95	4.15	3.49
Сумма С	5.00	5.02	5.01	5.01	5.00	5.01	5.00	4.99	5.01	5.00	5.00	5.01	5.01
Mn ²⁺	—	—	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	—	—	0.02	—	—
Fe ²⁺	—	—	0.07	0.24	0.18	0.31	0.20	0.03	—	—	—	—	—
Ca	1.78	1.88	1.73	1.75	1.71	1.66	1.79	1.95	1.87	1.89	1.78	1.71	1.74
Na	0.22	0.12	0.17	—	0.09	0.02	—	0.01	0.14	0.11	0.20	0.29	0.26
Сумма В	2.00	2.00	2.00	2.01	1.99	2.00	2.01	2.01	2.01	2.00	2.00	2.00	2.00
Na	0.10	0.01	0.16	0.82	0.58	0.75	0.59	0.80	0.68	0.67	—	0.16	0.14
K	0.02	0.05	0.01	0.06	0.03	0.01	0.04	0.18	0.25	0.27	0.08	0.01	0.06
Сумма А	0.12	0.06	0.17	0.88	0.61	0.76	0.63	0.98	0.93	0.94	0.08	0.17	0.20
ОН	1.98	1.95	1.98	1.88	1.67	1.61	1.75	1.86	1.22	1.45	1.86	1.93	1.94
F	—	—	—	—	—	—	—	—	0.22	0.35	—	—	—
O	0.02	0.05	0.02	0.13	0.33	0.39	0.25	0.14	0.56	0.20	0.14	0.07	0.06
Сумма W	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00								

Примечание. Act – актинолит, Ed – эденит, Prg – паргасит, Hst – гастингсит, Mhst – магнезиогастингсит, Mfhbl – магнезиоферригорнблендит. * Для всех анализов расчет к.ф. выполнен по алгоритму (Locock, 2014). См. электронное приложение, файл Ca-Amp.xlsx.

Анализы:

210 – базальт, г. Куамдеспакх. Обр. ЛВ-137/5. AZtec.

267 – метаморфизованная вулканогенно-осадочная порода, г. Страшмпакх. Обр. ЛВ-01-35. ЕРМА.

1075 – оливиновый базальт, г. Киткнун. Обр. ЛВ-01-52а. ЕРМА.

115 – базальт, г. Куамдеспакх. Обр. ЛВ-137/5. ЕРМА.

128 – фенитизированная ультраосновная порода, г. Сэлсурт. Обр. ЛВ-01-24. ЕРМА.

238 – оливиновый базальт, г. Сэлсурт. Обр. ЛВ-01-28. ЕРМА.

262 – вулканогенно-осадочная порода, г. Пялкимпорр. Обр. ЛВ-01-32-1. ЕРМА.

117 – фенит, г. Сэлсурт. Обр. ЛВ-01-1Б. ЕРМА.

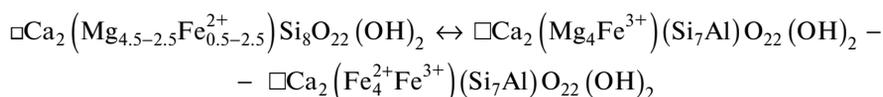
332, 333 – фенитизированный аннито-анортоклазовый роговик, г. Куйвчорр. Обр. ЛВ-117. AZtec.

281 – измененный оливиновый базальт, г. Сэлсурт. Обр. ЛВ-01-5. AZtec.

534 – туффит, г. Нинчурт. Обр. ЛВ-00-22А-1. ЕРМА.

1174 – оливиновый метабазаит, г. Пялкимпорр. Обр. ЛВ-01-32-2. ЕРМА.

нок” – промежуточных членов рядов магнезиоферригорнблендит–ферроферригорнблендит (схема (18)) и магнезиогорнблендит–феррогорнблендит (схема (19)):



актинолит \leftrightarrow магнезиоферригорнблендит – ферроферригорнблендит,

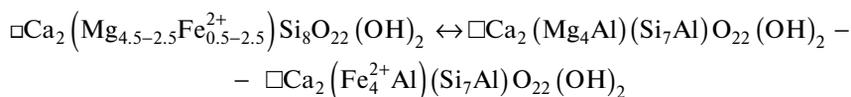


Таблица 9. Кадастр амфиболов Ловозерского массива
Table 9. Cadastre of amphibole group minerals in the Lovozero alkaline massif

Минеральный вид/ Mineral species	Распространенность	Комплексы и породы	Объекты или привязка	Источник (первые данные)
Группа натриевых амфиболов				
Магнезиоарфведсонит/Magnesio-arfvedsonite	Породообразующий минерал	Все породы и пегматиты	Повсеместно	Хомяков, 1990; наши данные
Калийарфведсонит/Potassic-arfvedsonite	Две находки	Пегматит	г. Кедыквырпахк	Реков et al., 2004
		Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород	г. Куамдеспахк	Наши данные
Магнезиофторарфведсонит/Magnesio-fluoro-arfvedsonite	Одна находка	Альбититы	г. Сэлсурт	Бондарева и др., 1959
	Часто встречающийся	Уртит, фойяит, амфиболовый и эвдиалитовый луяврит	Не указан	Герасимовский и др., 1966
	Часто встречающийся	Уртит (дифференцированный комплекс), луяврит (эвдиалитовый комплекс), ксенолиты вулканогенно-осадочных пород	Более трех проявлений	Наши данные
Калиймагнезиоарфведсонит/Potassic-magnesio-arfvedsonite	Одна находка	Роговообманковые луявриты	г. Куамдеспахк	Власов и др., 1959
Калиймагнезиофторарфведсонит/Potassic-magnesio-fluoro-arfvedsonite	Одна находка	Пегматит	г. Лепхельм	Семенов, Капитонова, 1964
Арфведсонит/Arfvedsonite	Редкий	Пегматоидный фойяит луяврит, эвдиалитовый комплекс	г. Сенгисчорр г. Аллуайв	Семенов, Капитонова, 1964; наши данные
Фторарфведсонит (гипотетический вид)/Fluoro-arfvedsonite	Одна находка	Амфиболовый луяврит	г. Паргуайв	Волков и др., 1962
Эккерманнит/Eckermannite	Одна находка	Пегматит?	г. Куйвчорр	Семенов, Капитонова, 1964
Ферроэккерманнит (гипотетический вид)/Ferro-eckermannite	Одна находка	Пегматит	г. Кедыквырпахк	Власов и др., 1959
Феррофторэккерманнит (гипотетический вид)/Ferro-fluoro-eckermannite	(?)	Дифференцированный комплекс	Более трех проявлений	Волков и др., 1962
Феррифторнибеит (гипотетический вид)/Ferri-fluoro-niobeite	Одна находка	Уртит	г. Нинчурт	Власов и др., 1959

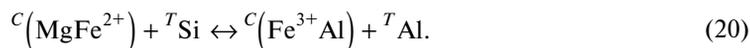
Таблица 9. Окончание

Минеральный вид/ Mineral species	Распростра- ненность	Комплексы и породы	Объекты или привязка	Источник (первые данные)
Группа натрий-кальциевых амфиболов				
Феррикатофо- рит/ <i>Ferri-katophorite</i>	Широко рас- пространен	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород, пойкилитовый комплекс	Более трех проявлений	Наши данные
Феррифторкатофо- рит/ <i>Ferri-fluoro-katophorite</i>	Редкие находки	Пегматит	г. Сенгисчорр	Семенов, Капитонова, 1964
		Фенитизированный базальтовый туф	г. Куйвчорр	Наши данные
Рихтерит/ <i>Richterite</i>	Редкие находки	Пегматит	г. Аллуайв	Хомяков, 1986
	Часто встречающийся	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород	г. Куйвчорр	Наши данные
Фторрихтерит/ <i>Fluoro-richterite</i>	Редкие находки	Амфиболовый луаврит	Не указан	Герасимовский и др., 1966
		Пойкилитовый вишневитовый сиенит	г. Сенгисчорр	Наши данные
Группа кальциевых амфиболов				
Актинолит/ <i>Actinolite</i>	Часто встречающийся	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород	Более трех проявлений	Наши данные
Эденит/ <i>Edenite</i>	Часто встречающийся	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород	Более трех проявлений	Наши данные
Паргасит/ <i>Pargasite</i>	Одна находка	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород	г. Сэлсург	Наши данные
Гастингсит/ <i>Hastingsite</i>	Одна находка	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород	г. Куйвчорр	Наши данные
Магнезиогастингсит/ <i>Magnesian-hastingsite</i>	Одна находка	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород	г. Куйвчорр	Наши данные
Магнезиоферригорнблендит/ <i>Magnesian-ferrihornblende</i>	Часто встречающийся	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород	Более трех проявлений	Наши данные



актинолит \leftrightarrow магнезиогорнблендит – феррогорнблендит.

При таком многокомпонентном изоморфизме двухвалентные магний и железо группы *C* замещаются на трехвалентные – железо и алюминий, с одновременным замещением кремния на алюминий в тетраэдрической позиции *T*:



Корреляция между компонентами, соответствующая схеме (20), показана на рис. 10.

Из других особенностей состава актинолита можно отметить вхождение железа в группу катионов *B* (табл. 8, электронное приложение, файл Ca-Amp.xlsx), возможно связанное с изоморфизмом в сторону магний-железо-марганцевых амфиболов.

Эденит $\text{NaCa}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Эденит определяется доминированием Na в группе A, Mg в группе C, OH-группами в анионной позиции W. Статус минерала сохранялся во всех номенклатурах амфиболов (Leake, 1978; Leake et al., 1987; Hawthorne et al., 2012). Установлено, что соединение, отвечающее идеальному составу эденита, неустойчиво, и в природных образцах эденит стабилизируется примесями железа и фтора. Видимо, именно поэтому близкие к “чистому” эдениту минеральные фазы в природе не встречены, и, более того, их не удается синтезировать (Oberti et al., 2006).

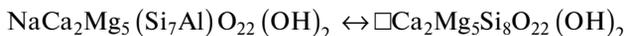
В Ловозерском массиве эденит (по данным электронно-зондового анализа) указан среди амфиболов, развивающихся по диопсиду в измененных вулканогенно-осадочных породах трапповой формации (Корчак и др., 2011). Нами минерал также установлен в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород (табл. 7).

Характерные черты морфологии эденита в породах Ловозерского массива

Эденит, наряду с флогопитом, минералами группы каолинита–серпентина, клинохлором, магнетитом, является характерным продуктом замещения форстерита в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород. В этих породах ксеноморфные зерна эденита входят в состав тонкозернистых агрегатов, состоящих также из энстатита, магнезиогастингсита, флогопита, диопсида (рис. 9, з). Такие агрегаты заполняют интерстиции крупных индивидов диопсида, магнетита, ильменит-эденитовых симплектитов. Эденит также образует каймы вокруг своих симплектитовых срастаний с ильменитом, а также вокруг флогопит-ильменит-магнетитовых гнезд (рис. 9, д–ж).

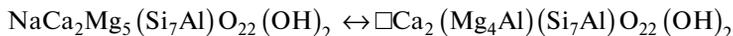
Химический состав эденита в породах Ловозерского массива

Химический состав эденита характеризуется значительными колебаниями содержания таких видообразующих элементов, как натрий, магний и алюминий (табл. 8, электронное приложение, файл Ca-Amp.xlsx). В некоторых образцах (табл. 8, БД 128) количество алюминия в тетраэдрической позиции T имеет предельно низкие значения $T\text{Al} = 0.54$ а. ф., отражая существенные изоморфные замещения по схеме (21), приводящие состав к границе эденита с тремолитом:



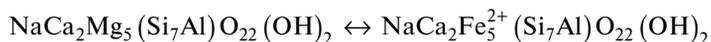
эденит \leftrightarrow тремолит.

В других случаях высокое содержание алюминия (табл. 8, БД 262) приводит к вхождению этого элемента в позицию C и смещению состава к магнезиогорнблендиту:



эденит \leftrightarrow магнезиогорнблендит.

Широкий изовалентный изоморфизм происходит между магнием и железом в группе C:



эденит \leftrightarrow ферроэденит.

При этом, содержание видообразующего кальция заметно выдержано для проанализированных образцов эденита (табл. 8, электронное приложение, файл Ca-Amp.xlsx).

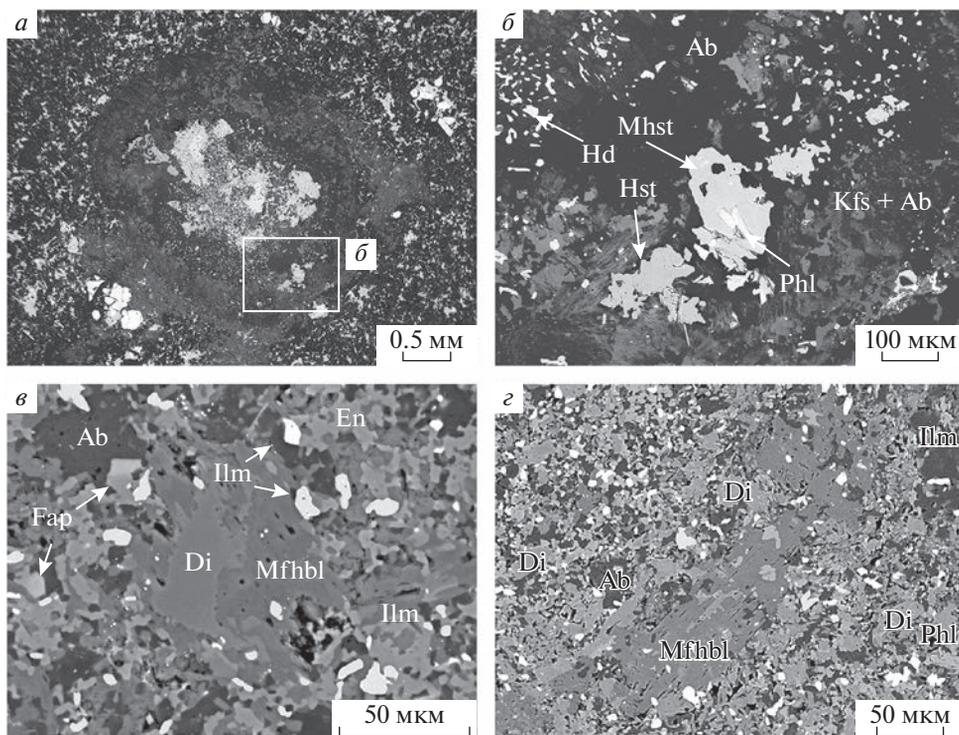


Рис. 11. Морфология гастингсита, магнезиогастингсита и магнезиоферригорнblendита в породах Ловозерского массива. *a, б* – ксеноморфные зерна гастингсита и магнезиогастингсита; фенитизированный аннитоанортотлазовый роговик, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-117; *в* – магнезиоферригорнblendит, обрастающий реликты диопсида; базальт, г. Куамдеспакх, обр. ЛВ-137/4; *з* – гипидиоморфный кристалл магнезиоферригорнblendита; метабазальт, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-131. СЭМ, BSE (обратно-рассеянные электроны) изображения. Hst – гастингсит, Mhst – магнезиогастингсит, Hd – геденбергит, Kfs – калиевый полевой шпат, Mfhbl – магнезиоферригорнblendит, Di – диопсид, En – энстатит, Ab – альбит, Phl – флогопит, Fap – фторапатит, Ilm – ильменит.

Fig. 11. Morphology of hastingsite, magnesio-hastingsite and magnesio-ferri-hornblendite in rocks of the Lovozero massif.

Паргасит $\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Для паргасита доминирующими являются: катионы Na в группе A, Mg среди двухвалентных и Al среди трехвалентных в группе C, OH-групп в W. Этот минеральный вид присутствует во всех номенклатурах амфиболов без изменений (Leake, 1978; Leake et al., 1987; Hawthorne et al., 2012).

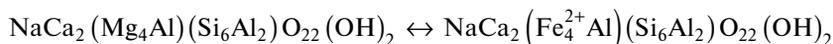
Подобно описанному выше актинолиту, паргасит упоминался в работе (Корчак и др., 2011) и установлен только в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород трапповой формации (табл. 7).

Характерные черты морфологии и химический состав паргасита в породах Ловозерского массива

Надежно диагностированный паргасит наблюдался в виде ксеноморфных зерен, образующих совместно с диопсидом, альбитом, титанитом, флогопитом и другими

минералами тонкозернистые агрегаты. Подобные агрегаты слагают участки неправильной формы или образуют концентрически-зональные структуры вокруг крупных зерен магнетита с ламеллями ильменита (рис. 9, з).

В составе паргасита (табл. 8) отметим примесь железа – проявление изовалентного изоморфизма с ферропаргаситом:



паргасит \leftrightarrow ферропаргасит,

а также высокое содержание алюминия, связанное с изоморфизмом в сторону саданагаита:



паргасит \leftrightarrow саданагаит.

Гастингсит $\text{NaCa}_2(\text{Fe}_4^{2+}\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Этот минеральный вид присутствует во всех номенклатурах амфиболов без изменений (Leake, 1978; Leake et al., 1987; Hawthorne et al., 2012) и определяется по доминированию натрия в группе А, железа среди двух- и трехвалентных катионов группы С, ОН-групп среди анионов W.

Сведений о более ранних находках гастингсита в породах Ловозерского массива нет.

Морфология и химический состав гастингсита в породах Ловозерского массива

Гастингсит – редкий амфибол, единичная, надежно диагностированная находка которого связана с фенитизированным аннито-анортоклазовым роговиком в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород (табл. 7).

Представлен мелкими ксеноморфными зернами и гипидиоморфными кристаллами, а также их скоплениями совместно с геденбергитом, магнезиогастингситом, паргаситом, аннитом, флогопитом, флюоритом, диопсидом, фторapatитом, фторбритолитом-(Ce), калиевым полевым шпатом и альбитом, образующими концентрически-зональные агрегаты в тонкозернистой основной массе породы (рис. 11, а, б).

В составе гастингсита отметим крайне незначительное преобладание двухвалентного железа над магнием в группе С, позволившее отнести минерал к собственно гастингситу, находящемуся на границе с магнезиогастингситом (табл. 8, электронное приложение, файл Ca-Amp.xlsx). Высокие содержания калия и марганца в изученных в одном образце гастингсите и, забегая вперед, магнезиогастингсите, отражают геохимическую специфику данной породы, а не общую закономерность для этих минералов из Ловозерского массива (табл. 8, БД 332, 333).

Магнезиогастингсит $\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Магнезиогастингсит – магниевый аналог гастингсита, присутствует во всех номенклатурах амфиболов (Leake, 1978; Leake et al., 1987; Hawthorne et al., 2012). В отличие от гастингсита сведения о наличии магнезиогастингсита в породах трапповой формации приведены в работе (Корчак и др., 2011).

Нами магнезиогастингсит установлен в той же породе, что и описанный выше гастингсит. Эти минералы неразличимы в образцах и препаратах (рис. 11, а, б), точная диагностика возможна только по данным химического состава (табл. 8).

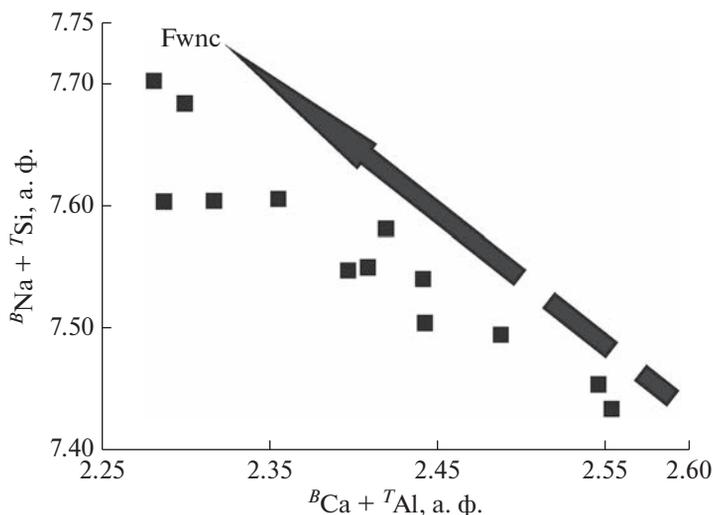


Рис. 12. Корреляция элементов при гетеровалентном изоморфизме в магнезиоферригорнблендите. Fwnc – ферривинцит.

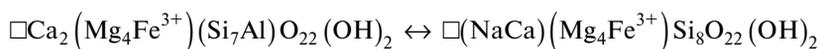
Fig. 12. Correlation of elements in heterovalent isomorphisms for magnesian-ferri-hornblende.

Магнезиоферригорнблендит $\square\text{Ca}_2(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Магнезиоферригорнблендит как самостоятельный минеральный вид утвержден КНМНК ММА в 2022 г. Он найден в префектуре Бёртала (Börtala Autonomous Prefecture), Китай (Zhang et al., 2022), и именно это место указано как его “Type Locality”. Однако амфибол, химический состав которого отвечает магнезиоферригорнблендиту, был изучен ранее в метасоматитах доломитового карьера Отамо (Otamo), Финляндия (Zarubina et al., 2016). Название минерала полностью отражает доминирующие катионы для этой “роговой обманки”: магний – среди двухвалентных, и железо – среди трехвалентных в группе С, ОН-группы – среди анионов группы W.

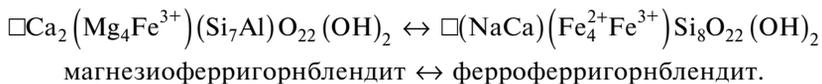
В Ловозерском массиве магнезиоферригорнблендит, как и другие кальциевые амфиболы, установлен только в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород (табл. 7). Минерал представлен ксеноморфными зёрнами и гипидоморфными кристаллами, часто находящимися в тесной пространственной и, вероятно, генетической связи с диопсидом и флогопитом (рис. 11, в, з). Индивиды магнезиоферригорнблендита могут содержать включения энстатита, ильменита, флогопита, альбита, в краевых зонах – вросстки актинолита. Магнезиоферригорнблендит совместно с актинолитом и флогопитом образует внешние каймы в псевдоморфозах по форстериту (рис. 9, в).

В составе магнезиоферригорнблендита существенно варьируют содержания как видообразующих, так и примесных элементов (табл. 8, электронное приложение, файл Ca-Amp.xlsx). Наиболее четко выражены схемы гетеровалентного (схема (26), рис. 12) изоморфизма с ферривинцитом и изовалентного с ферроферригорнблендитом (схема (27)).



магнезиоферригорнблендит \leftrightarrow ферривинцит.





Таким образом, изоморфные замещения в магнезиоферригорнблендите связывают его как с собственно кальциевыми, так и с натрий-кальциевыми минеральными видами.

Общим для этой подгруппы амфиболов, по сравнению с другими подгруппами, является предельно низкое содержание фтора.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследований в рамках настоящей работы вместе с данными из литературных источников позволили установить 21 минеральный вид из надгруппы амфиболов в породах Ловозерского массива. Из них 11 относятся к подгруппе натриевых амфиболов, 4 – кальций-натриевых и 6 – кальциевых. Результаты объединены в табл. 9.

Амфиболы натриевой подгруппы закономерно являются самыми распространенными в породах Ловозерского массива. Авторами надежно диагностированы четыре минеральных вида: магнезиоарфведсонит, магнезиофторарфведсонит, арфведсонит и калийарфведсонит. Магнезиоарфведсонит по частоте встречаемости и разнообразию пород значительно превосходит остальные виды. Весьма ограниченный круг натриевых амфиболов – 4 из 21 официально утвержденных минеральных вида этой группы, при резком доминировании одного из них – магнезиоарфведсонита, отражает специфику геохимии пород и условий их кристаллизации. Морфология, внутреннее строение и взаимоотношения с минералами ассоциации указывают на полигенеративность магнезиоарфведсонита в щелочных породах, вслед за эгирином, с которым амфибол находится в тесной пространственной и генетической связи. Для калийарфведсонита из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород предполагается образование под воздействием щелочных растворов, отделившихся от кристаллизующихся пород массива. Гидротермальное происхождение указано для калийарфведсонита из пегматита (Rekov et al., 2004). В химическом составе натриевых амфиболов проявлены широкие вариации содержания видообразующих и примесных элементов. Изоморфные замещения связывают составы изученных видов как с другими натриевыми, так и с натрий-кальциевыми амфиболами. Последнее особенно выражено для амфиболов из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород.

Амфиболы Na-Ca группы имеют закономерно меньшее распространение в породах Ловозерского массива, по сравнению с представителями натриевой группы. Они установлены только в породах пойкилитового комплекса и в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород трапповой формации. Из группы наиболее часто в породах массива встречаются феррикатофорит и рихтерит. Развитие амфиболов в виде пойкилокристаллов, содержащих включения всех пороодообразующих минералов, каймы амфиболов вокруг индивидов пироксенов, идиоморфные кристаллы в агрегатах цеолитов, альбита, – все эти морфологические черты указывают на позднее образование Na-Ca амфиболов. Не исключено полистадийное образование этих амфиболов, на что указывают различные формы нахождения минерала в одной и той же породе, как например, рихтерита и фторрихтерита (рис. 8).

Для Na-Ca амфиболов характерна тесная пространственная связь с пироксенами. При этом временные соотношения между ними различны. По отношению к диопсиду, эгирин-авгиту амфиболы проявляют себя как более поздние по времени кристаллизации (рис. 6). По отношению к эгирину, напротив, Na-Ca амфиболы являются более ранними.

В химическом составе Na-Ca амфиболов проявляются разнообразные схемы изоморфных замещений, приводящие к существенным вариациям содержанием элементов. Изоморфизм происходит как между минералами данной группы, так и с минералами группы натриевых и группы кальциевых амфиболов. Примечательно, что среди рассмотренной группы амфиболов уже два минерала “перешли границу” ОН/Ф – доминирующих видов: феррикатофорит и рихтерит. Это связано с заметным накоплением фтора в среде минералообразования при формировании пород пойкилитового комплекса, которые рассматриваются в качестве “предгематитовых” образований (Mikhailova et al., 2021).

Шесть амфиболов кальциевой группы установлены в Ловозерском массиве в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород трапповой формации: актинолит, эденит, паргасит, гастингсит, магнезиогастингсит и магнезиоферригорнблендит. Их присутствие в вулканогенно-осадочных породах вполне закономерно и связано с более известковистой обстановкой минералообразующей среды. Морфологические особенности: ксеноморфные индивиды, пойкилитовое строение, развитие в виде каймы на индивидах других минералов, присутствие в псевдоморфозах по ранним минералам, указывают на кристаллизацию минералов в стесненных условиях, существовавших в ходе метасоматических изменений ксенолитов вулканогенно-осадочных пород.

Разнообразие минеральных видов, а также различные широкие схемы изоморфных замещений, как между минералами внутри группы, так и в сторону Na-Ca амфиболов, указывают на локальность и специфичность обстановок кристаллизации кальциевых амфиболов, что обусловлено как изменчивостью исходного субстрата вулканогенно-осадочных пород, так и вариациями воздействовавших на него метасоматирующих растворов и физико-химическими условиями преобразований.

Характерной особенностью амфиболов Ловозерского массива является то, что химические составы практически всех видов (за исключением калийарфведсонита) существенно смещены от конечных членов, вплоть до пограничных составов, например, гастингсит и магнезиогастингсит.

На результаты пересчетов химических анализов амфиболов в части отнесения к тому или иному минеральному виду влияют следующие факторы: (1) близкие или, по крайней мере, сопоставимые содержания видообразующих компонентов; (2) наличие примесей, влияющих на расчет формульных коэффициентов элементов, например, титана; (3) неполнота данных электронно-зондовых анализов: отсутствие определения двух- и трехвалентных катионов, содержания H_2O . Соответственно, отнесение амфибола к определенному минеральному виду обладает некоторой вариативностью. Мы в своей работе постарались максимально строго провести отбор аналитических данных, корректно выполнить пересчет и разделение амфиболов на виды. Не исключая возможность иной интерпретации химических составов, авторы постарались показать все разнообразие минералов этой группы по имеющимся на данный момент результатам.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А19-119100290149-1 (электронно-микроскопические исследования, создание базы данных) и проекта РФФ № 21-47-09010 (рентгеноструктурные исследования).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.Н. Яковенчуку за предоставленные образцы пород, А.В. Базай за выполнение электронно-зондовых и электронно-микроскопических исследова-

ний некоторых образцов, Д.А. Филинскому и М.Ю. Глазуновой за помощь в подготовке материалов для исследований и публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баженов А.Г., Недосекова И.Л., Петерсен Э.У. Фторрихтерит $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{F},\text{OH})_2$ – новый минеральный вид в группе амфиболов // ЗВМО. **1993**. № 3. С. 98–102.

Баженов А.Г., Недосекова И.Л., Кринова Т.В., Миронов А.Б., Хворов П.В. Фтормагнезиоарфведсонит $\text{NaNa}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_4\text{Fe}^{3+}[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{F},\text{OH})_2$ – новый минеральный вид в группе амфиболов (щелочной комплекс Ильменских-Вишневых гор, Южный Урал) // ЗВМО. **2000**. № 6. С. 28–35.

Бондарева А.М., Рогачев Д.Л., Сахаров А.С. Литийсодержащий амфибол из контактной зоны Ловозерского массива // ЗВМО. **1959**. № 6. С. 710–712.

Буссен И.В., Сахаров А.С. Петрология Ловозерского щелочного массива. Л.: Наука, **1972**. 296 с.

Буссен И.В., Сахаров А.С. Строение Ловозерского щелочного массива // ЗВМО. **1958**. № 1. С. 101–106.

Власов К.А., Кузьменко М.В., Еськова Е.М. Ловозерский щелочной массив: породы, пегматиты, минералогия, геохимия и генезис. М.: Изд-во АН СССР, **1959**. 623 с.

Волков В.П., Поляков А.И., Караханова М.И. Особенности химизма породообразующих минералов дифференцированного комплекса Ловозерского щелочного массива // Геохимия. **1962**. № 6. С. 482–489.

Герасимовский В.И., Поляков А.И. Сфен-амфиболовый ийолит-мельтейгит из Ловозерского массива // ДАН СССР. **1962**. Т. 143. № 5. С. 1179–1181.

Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н., Поляков А.И., Сапрыкина Т.В., Балашов Ю.А. Геохимия Ловозерского щелочного массива. ГЕОХИ АН СССР. М.: Наука, **1966**. 392 с.

Зайцев В.А., Сенин В.Г. Состав темноцветных минералов из порфиroidных лувритов г. Паргуйв (Ловозерский массив). “Геохимия магматических пород” // Материалы XXV Всероссийского семинара с участием стран СНГ. Школа “Щелочной магматизм Земли”. СПб–М., **2008**. С. 56–57.

Корчак Ю.А., Меньшиков Ю.П., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю. Трапповая формация Кольского полуострова // Петрология. **2011**. Т. 19. № 1. С. 89–103.

Минералы Хибинских и Ловозерских тундр / Ред. Ферсман А.Е., Смольянинов Н.А., Бонштедт Э.М. М.–Л.: Издательство Академии наук СССР, **1937**. 563 с.

Номенклатура амфиболов: доклад Подкомитета по амфиболом Комиссии по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации (КНМНМ МА) // ЗВМО. **1997**. № 6. С. 82–102.

Пеков И.В. Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М.: Творческое объединение “Земля” Ассоциации Экост, **2001**. 464 с.

Семенов Е.И., Капитонова Т.А. Амфиболы и пироксены щелочных пегматитов Ловозерского массива / Минералогия и генетические особенности щелочных массивов. М.: **1964**. С. 3–14.

Семенов Е.И. Минералогия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, **1972**. 307 с.

Хомяков А.П. Минералогия ультраагпаитовых щелочных пород. М.: Наука, **1990**. 196 с.

Шаблинский Г.Н. К вопросу о глубинном строении Хибинского и Ловозерского плутонов // Труды Ленинградского общества естествоиспытателей. **1963**. Т. 74. № 1. С. 41–43.

Amphibole Supergroup Minerals in the Lovozero Alkaline Massif (Kola Peninsula)

L. M. Lyalina^{a,*}, Ya. A. Pakhomovsky^a, J. A. Mikhailova^a, and E. A. Selivanova^a

^a*Geological Institute, Federal Research Centre Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, 14 Fersman Street, Apatity, 184209 Russia*

**e-mail: l.lyalina@ksc.ru*

On the base of published data and results of original researches, there were revealed 21 mineral species of the amphibole supergroup minerals in the Lovozero alkaline massif (Kola peninsula, Russia). Among them, 11 species belong to sodium amphiboles, 4 species are sodium-calcium amphiboles and 6 species – calcium ones. Sodium amphiboles are widely present in alkaline rocks of all complexes in the Lovozero massif – layered, eudialyte, and poikilitic complexes, in pegmatites and hydrothermal veins, as well as in roof xenoliths of

volcanoclastic rocks of the trap formation. Magnesio-arfvedsonite is the most widespread sodium amphibole, often it is the rock-forming and the main melanocratic mineral. Sodium-calcium amphiboles are found in the poikilitic complex and in xenoliths of volcanoclastic rocks. Calcium amphiboles occur only in xenoliths of volcanoclastic rocks altered metamorphically or metasomatically in different degree. There are analyzed morphology, chemical composition, isomorphic replacements and paragenetic associations of amphiboles in the Lovozero massif, their belonging to different types and complexes of rocks, and their abundance. The critical review of previously published data on amphiboles in the Lovozero massif is given according to the present nomenclature of the amphibole supergroup minerals.

Keywords: sodium amphiboles, sodium-calcium amphiboles, calcium amphiboles, alkaline rocks, Lovozero massif

REFERENCES

- Bazhenov A.G., Nedosekova I.L., Petersen E.U. Ftorrichterite $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{F},\text{OH})_2$ – a new mineral species in the amphibole group. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1993**. N 3. P. 98–102 (in Russian).
- Bazhenov A.G., Nedosekova I.L., Krinova T.V., Mironov A.B., Khvorov P.V. Fluormagnesioarfvedsonite $\text{NaNa}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_4\text{Fe}^{3+}[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{F},\text{OH})_2$ – a new mineral species of the amphibole group (I'meny-Vishnevy mountains alkaline massif, the South Urals). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2000**. N 6. P. 28–35 (in Russian).
- Bondareva A.M., Rogachev D.L., Sakharov A.S. Lithium-bearing amphibole from the contact zone of the Lovozero massif. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1959**. N 6. P. 710–712 (in Russian).
- Bussen I.V., Sakharov A.S. The structure of the Lovozero alkaline massif. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1958**. N 1. P. 101–106 (in Russian).
- Bussen I.V., Sakharov A.S. Petrology of the Lovozero alkaline massif. Leningrad: Nauka, **1972**, 296 p. (in Russian).
- Gerasimovsky V.I., Polyakov A.I. Sphene-amphibole ijolite-melteigite from Lovozero massif. *Doklady Earth Sci.* **1962**. Vol. 143. P. 1179–1181 (in Russian).
- Gerasimovsky V.I., Volkov V.P., Kogarko L.N., Polyakov A.I., Saprykina T.V., Balashov Yu.A. Geochemistry of the Lovozero alkaline massif. GEOCHE Academy of Sciences of the USSR. Moscow: Nauka, **1966**. 392 p. (in Russian).
- Hålenius U., Hatert F., Pasero M., Mills S.J. IMA Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification (CNMNC). Newsletter 29. New minerals and nomenclature modifications approved in 2015 and 2016. *Mineral. Mag.* **2016**. Vol. 80. N 1. P. 199–205.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. Nomenclature of the amphibole supergroup. *Amer. Miner.* **2012**. Vol. 97. P. 2031–2048.
- Khomyakov A.P. Mineralogy of Hyperagpaitic Alkaline Rocks. Moscow: Nauka, **1990**. 196 p. (in Russian).
- Kramm U., Kogarko L.N. Nd and Sr isotope signatures of the Khibina and Lovozero Agpaitic Centres, Kola Alkaline Province, Russia. *Lithos*. **1994**. Vol. 32. N 3–4. P. 225–242.
- Korchak Y.A., Men'shikov Y.P., Pakhomovskii Y.A., Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Y. Trap Formation of the Kola Peninsula. *Petrology*. **2011**. Vol. 19. N 1. P. 87–101.
- Leake B.E. Nomenclature of amphiboles. *Canad. Miner.* **1978**. Vol. 16. P. 501–520.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Guo Y. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Canad. Miner.* **1997**. Vol. 35. P. 219–246.
- Locock A.J. An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. *Computers & Geosciences*. **2014**. Vol. 62. P. 1–11.
- Mikhailova J.A., Ivanyuk G.Yu., Kalashnikov A.A., Pakhomovsky Ya.A., Bazai A.V., Yakovenchuk V.N. Petrogenesis of the Eudialyte Complex of the Lovozero Alkaline Massif (Kola Peninsula, Russia). *Minerals*. **2019**. Vol. 9. N 10. P. 581.
- Minerals of the Khibiny and Lovozero. Ed. by Fersman A.E., Smol'yaninov N.A., Bonshtedt E.M. Moscow-Leningrad: Academy of Science USSR Press. **1937**. 563 p. (in Russian).
- Mitchell R.H., Wu F.Y., Yang Y.H. In Situ U–Pb, Sr and Nd isotopic analysis of loparite by LA-(MC)-ICP-MS. *Chemical Geology*. **2011**. Vol. 280. N 1–2. P. 191–199.

Miyashiro A. The chemistry, optics, and genesis of the alkali-amphiboles. Journal of Faculty of Science, University of Tokyo, Section II. **1957**. N 11. P. 57–83.

Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the Commission on new minerals and mineral names of the International Mineralogical Association (CNMNC). *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1997**. N 6. P. 82–102 (in Russian).

Oberti R., Camara F., Della Ventura G., Iezzi G., Benimoff A.I. Parvo-mangano-edenite, parvo-manganotremolite, and the solid solution between Ca and Mn^{2+} at the M4 site in amphiboles. *Amer. Miner.* **2006**. Vol. 91. N 4. P. 526–532.

Oberti R., Boiocchi M., Hawthorne F.C., Ball N.A., Harlow G.E. Magnesio-arfvedsonite, IMA 2013-137. CNMNC Newsletter N 20, June 2014, P. 553. *Miner. Mag.* **2014**. Vol. 78. P. 549–558.

Oberti R., Boiocchi M., Hawthorne F.C., Ball N.A., Martin R.F. Ferri-fluoro-katophorite from Bear Lake diggings, Bancroft area, Ontario, Canada: a new species of amphibole, ideally $Na(NaCa)(Mg_4Fe^{3+})(Si_7Al)O_{22}F_2$. *Miner. Mag.* **2019**. Vol. 83. N 3. P. 413–417.

Pekov I.V. Lovozero Massif: History, Pegmatites, Minerals. Moscow: Ocean Pictures Ltd., **2000**. 484 p.

Pekov I.V., Chukanov N.V., Lebedeva Yu.S., Pushcharovsky D.Yu., Ferraris G., Gula A., Zadov A.E., Novakova A.A., Petersen O.V. Potassicarfvedsonite, $KNa_2Fe_4^{2+}Fe^{3+}Si_8O_{22}(OH)_2$, a K-dominant amphibole of the arfvedsonite series from apatitic pegmatites – Mineral data, structure refinement and disorder in the A site. *N. Jb. Miner. Mh.* **2004**. N 12. P. 555–574.

Semenov E.I., Kapitonova T.A. Amphiboles and pyroxenes from alkaline pegmatite of the Lovozero massif. In: *Mineralogy and genetic features of alkaline massifs*. Moscow, **1964**. P. 3–14 (in Russian).

Semenov E.I. Mineralogy the Lovozero massif. Moscow: Nauka, **1972**. 307 p. (in Russian).

Shablinsky G.N. On the deep structure of Khibiny and Lovozero intrusions. In: *Materials of the Leningrad Society of Natural Scientists*. **1963**. Vol. 74. N 1. P. 41–43 (in Russian).

Vlasov K.A., Kuzmenko M.V., Eskova E.M. The Lovozero alkaline massif: rocks, pegmatite, mineralogy, geochemistry and genesis. Moscow: Academy of Science USSR Press, **1959**. 623 p. (in Russian).

Volkov V.P., Polyakov A.I., Karakhanova M.I. Features of chemistry of rock-forming minerals of the Layered complex of the Lovozero alkaline massif. *Geochem. Int.* **1962**. N 6. P. 482–489 (in Russian).

Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Miner. Mag.* **2021**. Vol. 85. Issue 3. P. 291–320.

Wu F.Y., Yang Y.H., Marks M.A.W., Liu Z.C., Zhou Q., Ge W.C., Yang J.S., Zhao Z.F., Mitchell R.H., Markl G. In Situ U–Pb, Sr, Nd and Hf isotopic analysis of eudialyte by LA–(MC)–ICP–MS. *Chemical Geology*. **2010**. Vol. 273. Issue 1–2. P. 8–34.

Zaitsev V.A., Senin V.G. The composition of mafic minerals from porphyritic luyavrites from mt. Parguaiv (Lovozero massif). Geochemistry of magmatic rocks. Proceedings of XXV Russian with the participation of the CIS countries Workshop “Geochemistry of alkaline rocks”. Saint Petersburg–Moscow. **2008**. P. 56–57 (in Russian).

Zhang Y., Gu X., Li T., Fan G., Zhang Y., Wang J. Magnesio-ferri-hornblende. In: CNMNC Newsletter 66. *Eur. J. Miner.* **2022**. P. 34.

Zarubina E.S., Aksenov S.M., Chukanov N.V., Rastsvetaeva R.K. Crystal Structure of Magnesio-Ferri-Hornblende $\square Ca_2(Mg_4Fe^{3+})[(Si_7Al)O_{22}](OH)_2$ as a Potentially New Mineral of the Amphibole Supergroup. *Doklady Chemistry*. **2016**. Vol. 470. P. 245–251.