

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, Анатиты, 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 амфиболовы 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 амфиболовом, часто становясь породообразующим и главным среди темноцветных минералов. Натрий-кальциевые амфиболовы характерны для пород пойкилитового комплекса и ксенолитов вулканогенно-осадочных образований. Кальциевые амфиболовы 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 амфиболовы, натрий-кальциевые амфиболовы, кальциевые амфиболовы, 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 фоидолитами (луявитами, фойяитами, ийолитами, уртитами и другими разновидностями пород), содержит многочисленные ксенолиты кровли и окружен ореолом фенитизации. Характерными акцессорными, а часто и породообразующими, минералами большинства пород массива являются амфиболовы, 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 луявитах (Волков и др., 1962), в сфен-амфиболовом ийолит-мелтейгите (Герасимовский, Поляков, 1962), а также в урритах 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”, “экermannит”, “магнезиорибекит” и “катофорит” из нефелин-сиенитовых пегматитов, а также рассмотрен типоморфизм состава амфиболов в различных парагенетических ассоциациях редкometальных минералов. Так, “арфведсонит”, практически не содержащий кальция и магния, присутствует в высоконатриевой ассоциации с мурманитом, рамзайтом, усингитом, эвдиалитом, нордитом в пегматитах гор Сенгисчорр, Пункаруай и Карнасурт. Напротив, существенно кальциевый “катофорит” встречается в ассоциации с розенбушитом и ловенитом в пегматитах долины реки Мураай, генетически связанных с пойкилитовыми сиенитами.

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 магнезиоферрикатофорита) 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 амфибала в публикациях, заимствовавших 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 луявит, г. Куамдеспахк	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)	Феррифторнибент**
926	Щелочной породообразующий амфибол (Волков и др., 1962) луявит амфиболовый	Безназвания (Буссен, Сахаров, 1972), арфведсонит (Пеков, 2001)	Феррофторэкерманнит**
1125	Щелочной породообразующий амфибол (Волков и др., 1962) сфен-амфиболовый ийолит-мелтьейгит	Без названия (Герасимовский, Поляков, 1962), безназвания (Буссен, Сахаров, 1972)	Феррофторэкерманнит**
927	Щелочной породообразующий амфибол (Волков и др., 1962) луявит 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	Эккерманнит (Семенов, Капитонова, 1964) г. Непха	Арфведсонит (Семенов, 1972), ферриэккерманнит**** (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, заимствовавших 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), магнезиоферрикатофорит (Пеков, 2001)	Феррифторкатофорит
1154	Арфведсонит (Герасимовский и др., 1966) эвдиалитовый луявит	Арфведсонит (Семенов, 1972), без названия (Буссен, Сахаров, 1972)	Магнезиофторарфведсонит
1155	Арфведсонит (Герасимовский и др., 1966) амфиболовый луявит	Арфведсонит (Семенов, 1972), без названия (Буссен, Сахаров, 1972)	Фторрихтерит
932	Магнезиорибикит (Герасимовский и др., 1966) обр. № 1969	Арфведсонит (Семенов, 1972), магнезиорибикит (Буссен, Сахаров, 1972), магнезиорибикит (Пеков, 2001)	Фторрихтерит
934	Арфведсонит (Герасимовский и др., 1966) фойяйт	Арфведсонит (Семенов, 1972), без названия (Буссен, Сахаров, 1972), фтормагнезиоарфведсонит (Пеков, 2001)	Феррифторнибент**
928	Арфведсонит (Семенов, 1972) г. Аллуайв	Арфведсонит (Пеков, 2001)	Арфведсонит
936	LiMnMg-рибекит (Семенов, 1972) г. Непха	Фтормагнезиоарфведсонит (Пеков, 2001)	Калиймагне-зиофторарфведсонит
1157	Без названия (Буссен, Сахаров, 1972) эвдиалитовый луявит, г. Аллуайв, обр. № 2А		Магнезиофторарфведсонит
1158	Без названия (Буссен, Сахаров, 1972) сфеновый ийолит, обр. № 2207-К		Магнезиофторарфведсонит
929	Арфведсонит (Хомяков, 1990) г. Карнасурт	Магнезиоарфведсонит (Пеков, 2001)	Магнезиоарфведсонит
930	Арфведсонит (Хомяков, 1990) г. Аллуайв	Магнезиоарфведсонит (Пеков, 2001)	Рихтерит
931	Магнезиоарфведсонит (Пеков, 2001) альбитизированный мурманитовый луявит, 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 единогообразия расчета для всех анализов железо пересчитано на FeO. ** Неутвержденный (гипотетический) минеральный вид или промежуточный член серии твердых растворов. *** Ferri-rootname 14 – Na_(NaMn)(Mg₄Fe³⁺)₇Al₂(OH)₂ – крайний член изоморфного ряда с Rootname 14 Na_(NaMn)(Mg₄Al)₇Al₂(OH)₂ (Hawthorne et al., 2012). **** Ферриэкерманнит = 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 $\text{NaCaNaMg}_4\text{Fe}^{3+}\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$	Магнезиокатофорит $\text{Na}(\text{CaNa})\text{Mg}_4(\text{Al},\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{AlO}_{22})(\text{OH})_2$	Феррикатофорит $\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Магнезиоалюмокатофорит $\text{NaCaNaMg}_4\text{AlSi}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$	Магнезиокатофорит $\text{Na}(\text{CaNa})\text{Mg}_4(\text{Al},\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{AlO}_{22})(\text{OH})_2$	Катофорит $\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Феррикатофорит $\text{NaCaNaFe}_4^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$	Катофорит $\text{Na}(\text{CaNa})\text{Fe}_4^{2+}(\text{Al},\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{AlO}_{22})(\text{OH})_2$	Ферроферрикатофорит $\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Fe}_4^{2+}\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

состава, исключающие 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 микронализма (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 видового разнообразия, минералогические характеристики (морфология, свойства, химический состав, включения, парагенетические ассоциации), распространность 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 соответствие 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 Ловоzerosкого массива в пределах Кольского полуострова (вверху слева, спутниковый снимок, Landsat/Copernicus 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: эдиалитового, 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): луяврит–фойяит–уритит или луяврит–фойяит. Луявриты – 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 урититы – практически мономинеральные нефелиновые породы. Переходы между разными породами внутри ритма постепенные, а границы ритмов – резкие, часто маркируемые пластовыми или линзовидными пегматитами.

Эдиалитовый 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 эдиалитового комплекса приходится около 18% общего объема щелочных пород массива (Герасимовский и др., 1966). Главными породами эдиалитового комплекса являются луявриты, обогащенные минералами группы эдиалита – так называемые эдиалитовые луявриты. Среди них в подчиненном количестве присутствуют пластовые или линзовидные тела фойяитов, урититов (редко), а также мелкозернистых и порфировидных нефелиновых сиенитов. Послед-

ние содержат крупные вкрапленники микроклин-пертита и/или нефелина в мелко-зернистой 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, вишневита. 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. Неизмененные 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 неизмененными 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. Иванюком, 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 штуфных образцах (макроскопическое изучение, рентгеноструктурная диагностика) и в плоскостопированных 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 OH-групп. Различные схемы нормализации катионов могут выбираться автоматически или вручную. Для каждого анализа выходные данные включают группу, подгруппу, название минерального вида амфибала 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/caKmFAHzoitCjA>. 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, ${}^B\text{Ca}$ – кальций в группе B . Если упоминается несколько элементов из одной группы, то они объединяются в скобки, например, ${}^C(\text{Mg}\text{Fe}^{3+})$ – 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. Миширо (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, MMA) 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	— луявит; — фойит; — уртит	— эвдиалитовый луявит; — луявит; — порфировидный нефелиновый сиенит; — уртит	— фельдшпатоидный пойкилитовый сиенит; — неравномерно-зернистый нефелиновый сиенит	— арфведсонито-нефелино-полевошпатовый роговик; — фенит; — оливиновый базальт
Арфведсонит	—	— луявит	—	—
Магнезиофторарфведсонит	— уртит	— луявит	—	— 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 вrostки идиоморфных индивидов эгирина (рис. 2, *a*). Реже магнезиоарфведсонит наблюдается в виде включений неправильной формы в эгирине. Еще одной, редкой формой нахождения магнезиоарфведсонита в уртиках дифференцированного комплекса являются ксеноморфные выделения совместно с кальсилитом, эльпасолитом, микроклин-перитом 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 амфибала могут проявлять химическую неоднородность, со смешением 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

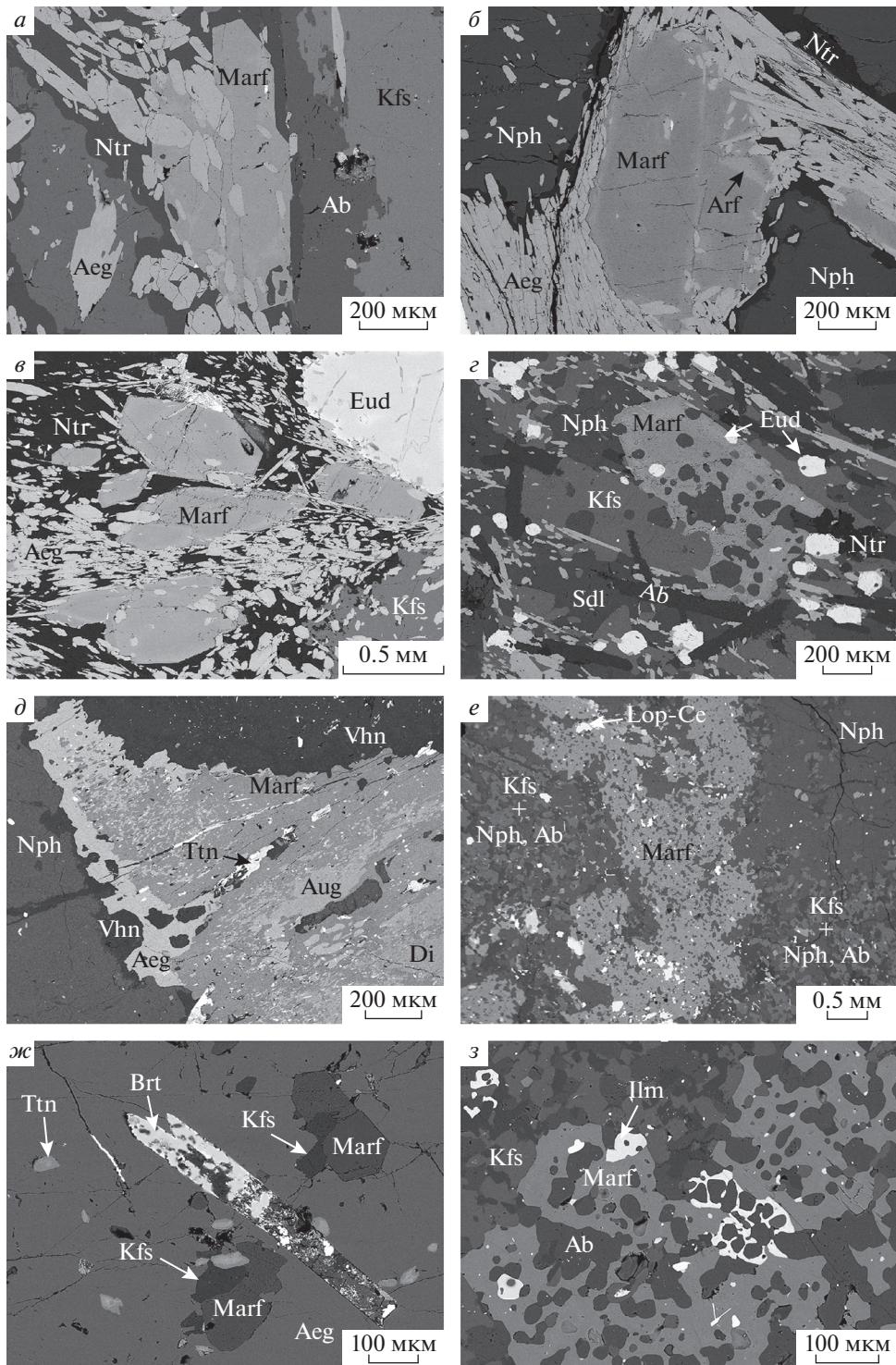


Рис. 2. Морфология магнезиоарфведсонита в породах Ловозерского щелочного массива. *а* – гипидиоморфные кристаллы магнезиоарфведсонита с вrostками эгирина; луяврит, дифференцированный комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-334; *б* – ксеноморфные выделения магнезиоарфведсонита с участками арфведсонита в агрегате эгирина; луяврит, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-224-3 (аналитик А.В. Базай); *в* – гипидиоморфные идиоморфные кристаллы магнезиоарфведсонита в агрегате эгирина и натролита; луяврит, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-237-89 (аналитик А.В. Базай); *г* – пойкилитовый кристалл магнезиоарфведсонита; контакт луяврита с порфировидным нефелиновым сиенитом, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-154/17; *д* – ксеноморфное выделение пертитоподобных срастаний 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. Куамдеспахк, обр. ЛВ-160-31; *з* – пойкилитовые зерна магнезиоарфведсонита; амфиболо-нефелино-полевошпатовый роговик, г. Куйчорр, обр. ЛВ-132. СЭМ, BSE (обратно-рассеянные электроны) изображения. Marg – 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 срастания различной морфологии. Наиболее часто встречаются агрегаты незакономерных (пертитоподобных) срастаний с различным соотношением минералов, каймы эгирина на ксеноморфных зернах амфиболя (рис. 2, *д*) и включения магнезиоарфведсонита в эгирине. Также магнезиоарфведсонит установлен в виде пойкилитовых зерен с многочисленными включениями нефелина, титанита, лопарита-(Ce), фторапатита, 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, гидроксилапатита (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:

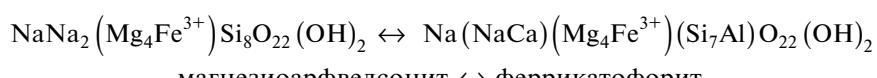


Таблица 4. Химический состав (мас. %) минералов подгруппы Na-амфиболов из пород Ловозерского массива
Table 4. Chemical composition (wt %) of sodium amphiboles in rocks of the Lovozero massif

Компонент	Минерал										Parf	
	Комплексы пород Ловозерского массива					Номер анализа в базе данных (БД)						
	диорференированный	эвдиалитовый	пойкилитовый	вулк.-осад.	эвдиал.	диорфер.	эвдиал.	вулк.-осад.	вулк.-осад.	980		
SiO₂	52.30	54.58	52.60	53.74	867	871	96	1205	1098	956	418	
TiO₂	1.60	1.06	2.05	1.76	0.06	0.60	1.05	54.35	52.93	53.03	52.28	
ZrO₂	—	—	—	—	0.74	0.76	1.15	—	—	1.62	2.08	
Al₂O₃	1.55	0.73	1.54	1.17	—	—	—	1.75	0.95	1.35	—	
V₂O₃	—	—	—	—	—	—	0.11	—	—	1.00	—	
Fe₂O₃расч	9.56	8.19	8.11	4.73	7.28	6.52	6.71	5.75	6.49	6.76	8.16	
FeO_{расч}	9.64	6.53	12.30	12.72	12.92	6.44	10.31	12.11	16.39	13.18	8.77	
MnO	1.45	1.18	1.47	1.32	2.30	0.98	3.32	0.51	1.60	1.59	1.37	
NiO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
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	
CaO	1.30	1.41	1.24	1.04	0.24	1.89	0.67	1.81	—	1.07	1.18	
Na₂O	8.80	8.39	8.81	8.66	8.46	9.01	9.06	8.46	9.01	8.21	8.63	
K₂O	1.56	1.50	1.62	1.74	2.12	1.49	1.88	1.32	1.67	1.66	1.61	
H₂O⁺расч	1.19	1.82	0.99	1.61	1.19	1.45	1.04	1.61	1.62	0.75	0.73	
F	1.00	—	1.18	—	1.20	1.10	1.60	—	—	1.60	2.10	
-O=F₂	0.42	0.00	0.50	0.00	0.51	0.46	0.67	0.00	0.00	0.67	0.88	
Сумма	100.14	99.14	100.35	98.55	99.02	100.68	100.58	99.15	99.60	98.33	98.66	
Формульные коэффициенты атомов, рассчитанные на указанной основе, и их распределение в стандартной формуле $A_{0-1}B_{2-5}T_8O_{22}W_2$												
Основа расчета*	16	13	16	13	16	16	16	16	16	13	16	
Si	7.74	7.95	7.84	8.05	8.04	7.97	8.00	7.86	8.03	7.95	7.85	
Al	0.26	0.05	0.16	—	0.03	—	0.14	—	0.05	0.15	0.17	
Сумма T	8.00	8.00	8.05	8.04	8.00	8.00	8.00	8.03	8.00	8.00	8.00	

Таблица 4. Продолжение

Компонент	Минерал												Parf	
	Комплексы пород Ловозерского массива													
	дифференцированный		эвдиалиитовый		пойкилилитовый		булк.-осад.		эвдиал.		диффер.			
	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	4.96	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	2.01	2.00	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	0.31	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									
	Комплексы пород Ловозерского массива					Mineral				
	дифференцированный	эвдиалитовый	пойкилитовый	вулк.-осад.	эвдиал.	диорфер.	эвдиал.	вулк.-осад.	вулк.-осад.	Parf
OH	450	621	1138	867	871	96	1205	1098	956	418
F	1.18	1.77	0.98	1.60	1.20	1.38	1.02	1.59	1.63	0.76
Mn	0.47	—	0.56	—	0.57	0.50	0.75	—	—	0.72
O	0.36	0.23	0.46	0.40	0.23	0.13	0.23	0.41	0.37	0.99
Сумма W	2.01	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00
										980

Примечание. Marf — магнезиоарфведсонит, Arf — арфведсонит, Marf — магнезиоарфведсонит, Parf — калийарфведсонит.* Для всех анализов расчет к. ф. выполнен по алгоритму (Locock, 2014) с использованием авторской электронной таблицы Excel. Отсутствие аналитических определений H_2O , FeO , Fe_2O_3 , MnO , Mn_2O_3 определило 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.xls.

Анализы:

450 — фойнит, г. Алтуай. Обр. ЛВ-309. ЕРМА.

621 — луяврит, г. Сэллеурт. Обр. ЛВ-01-07. ЕРМА.

1138 — уртит, г. Карнасурт. Обр. ЛВ-III-4-4. AZtec.

867 — луяврит, г. Алтуай. Обр. ЛВ-224-3. ЕРМА. Аналитик Базай А.В.

871 — уртит, г. Алтуай. Обр. ЛВ-224/146. ЕРМА.

96 — неравномнозернистый нефелиновый сиенит, г. Сентистчорр. Обр. ЛВ-371/1. ЕРМА.

1205 — фельдшпатогипсовый пойкилитовый сиенит, г. Пункаруай. Обр. ЛВ-429. AZtec.

1098 — оливиновый базальт, г. Киткнон. Обр. ЛВ-01-51B. ЕРМА.

956 — луяврит, г. Алтуай. Обр. ЛВ-224-3. AZtec.

418 — уртит, г. Алтуай. Обр. ЛВ-315/1. ЕРМА.

852 — луяврит, г. Алтуай. Обр. ЛВ-169-120. ЕРМА.

196 — амфиболо-анортитовый роговик, г. Куйчюр. Обр. ЛВ-121. AZtec.

980 — фенитизированная вулканогенно-осадочная порода, г. Куамдеспах. Обр. ЛВ-152/4. AZtec.

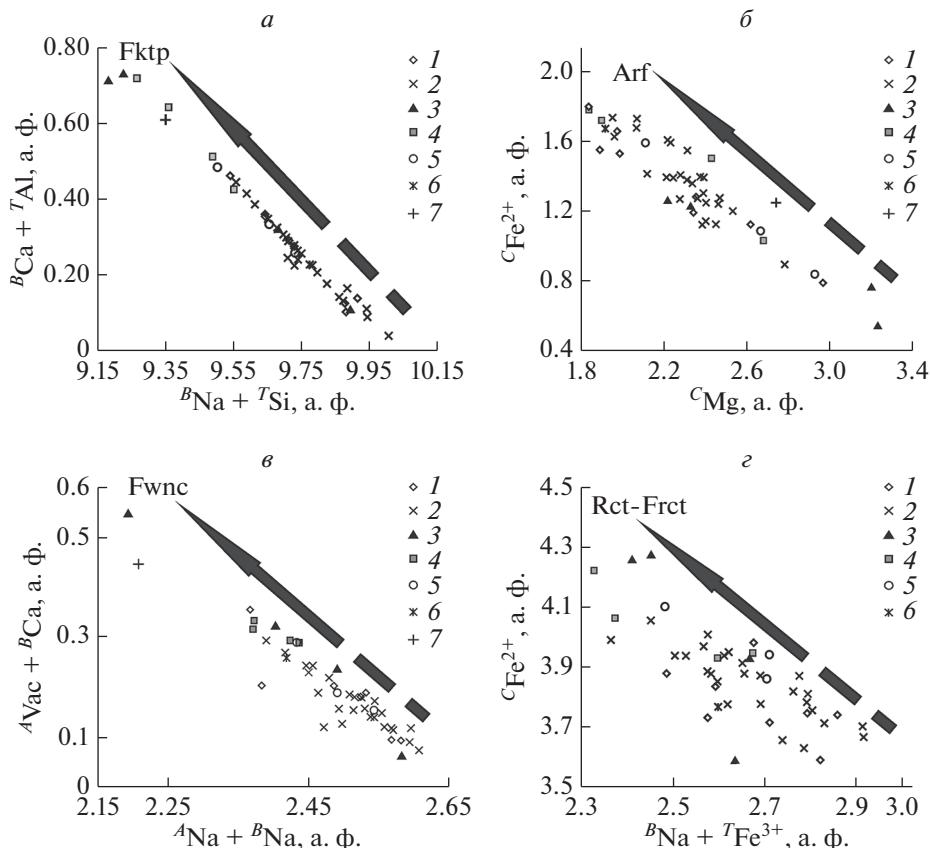
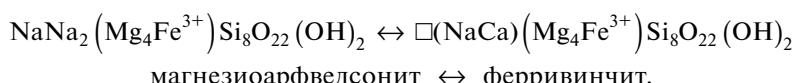


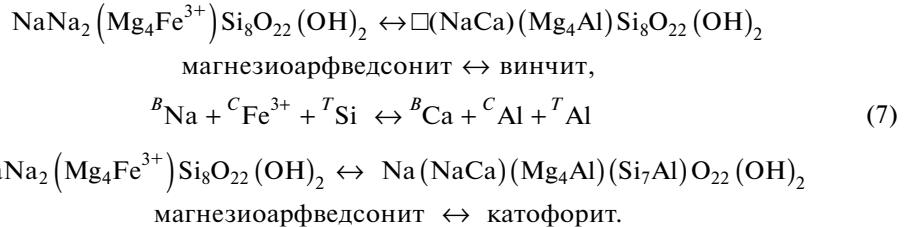
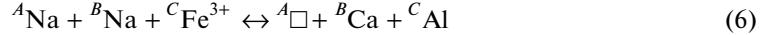
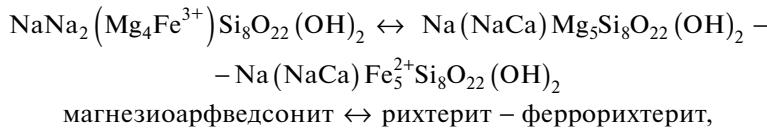
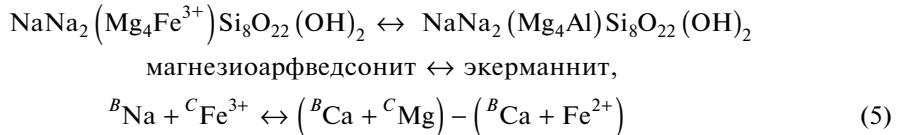
Рис. 3. Корреляция элементов при изоморфных замещениях в магнезиоарфведсоните. 1 – магнезиоарфведсонит из пород дифференцированного комплекса, 2 – магнезиоарфведсонит из пород эвдиалитового комплекса, 3 – магнезиоарфведсонит из пород пойкилитового комплекса, 4 – магнезиоарфведсонит из ксенолитов вулканогенно-осадочных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

Fig. 3. Correlation of elements in isomorphic replacements for magnesio-arpvedsonite.



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 магнезиофторарфведсонита.

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

Арфведсонит определяется доминирующим натрием в позиции *A*, двух- и трехвалентным железом в позиции *C*, OH-группами в позиции *W* стандартной формулы амфиболов $A_{0-1}B_2C_5T_8\text{O}_{22}W_2$. 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), феррифторнибейт (БД 1118, 934), феррофторэкерманнит (БД 926, 1125), фторарфведсонит (БД 927), ferri-rootname (БД 1119).

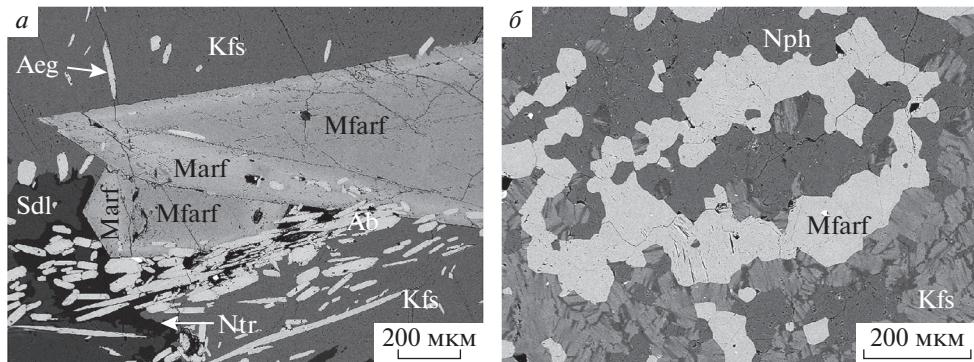


Рис. 4. Морфология магнезиофторарфведсонита в породах Ловозерского щелочного массива. *а* – неоднородные кристаллы амфиболя с магнезиофторарфведсонитом во внутренних зонах и магнезиоарфведсонитом во внешних; луявит, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв, обр. ЛВ-169-120; *б* – скопления зерен магнезиофторарфведсонита;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

Fig. 4. Morphology of magnesio-fluoro-arfvedsonite in rocks of the Lovozerо 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 луявира 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 луявирах 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), смешая состав к экерманниту, а натрий в позиции *A* изоморfen с калием, образуя ряд арфведсонит–калиярфведсонит.



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 уртитах

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

*Характерные черты морфологии магнезиофтотарфведсонита
в породах Ловозерского массива*

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

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

Химический состав магнезиофтотарфведсонита в породах Ловозерского массива

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



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 *A*, 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 амфиолов – “арфведсонит”, в котором K > Na в позиции *A*. В остальном он полностью аналогичен арфведсониту: доминирующее двух- и трехвалентное железо в позиции *C*, OH-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. Куамдеспах (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 флогопита, 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 образования калийарфведсонита совместно с “рудными” минералами – виоларитом, бартонитом, ильменитом, из гид-

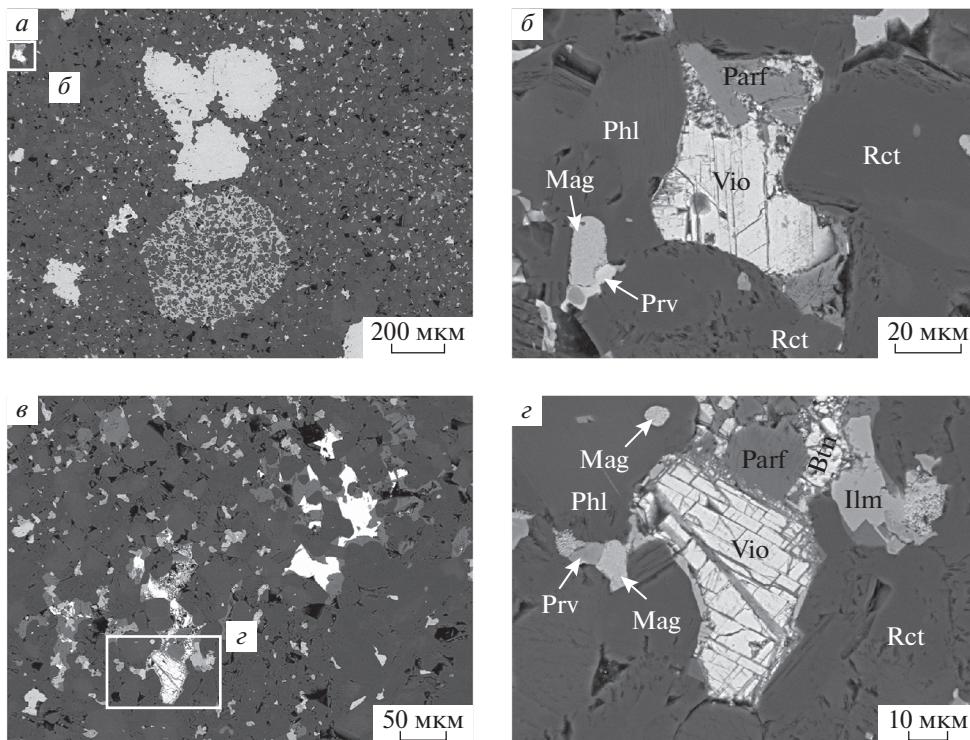


Рис. 5. Морфология калийарфведсонита в породах Ловозерского щелочного массива. *а, б* – идиоморфные призматические кристаллы, *в, г* – ксеноморфные зерна калийарфведсонита в ксенолите фенитизированной вулканогенно-осадочной породы, *г*. Куамдеспахк, обр. ЛВ-152/4. СЭМ, ВСЕ (обратно-рассеянные электроны)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

Fig. 5. Morphology of potassio-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 ультраагпайтовых комплексах (Ловозеро, Ильмаусак), 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 калиймагнезиоарфведсониту, 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

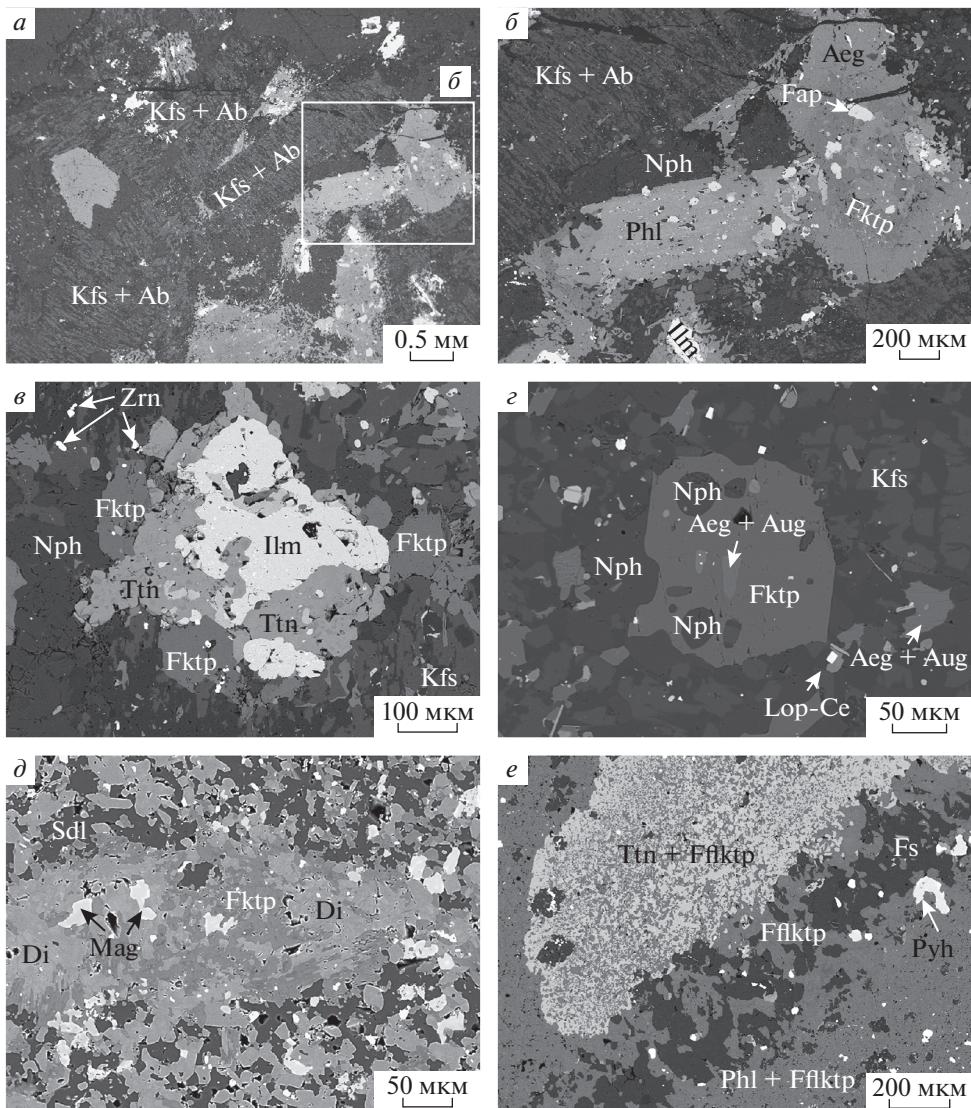
Минерал	Пойкилитовый комплекс	Ксенолиты вулканогенно-осадочных пород
Феррикатофорит	– неравномернозернистый нефелиновый сиенит;	– базальтовый туф; – метасоматически измененная вулканогенно-осадочная порода; – фенитизированная вулканогенно-осадочная порода;
Феррифторкатофорит	–	– фенитизированный базальтовый 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”). Амфибала, соответствующих калиймагнезиофорварфведсониту, нами установлено не было.

Кроме того, шесть ранее опубликованных анализов отвечают гипотетическим, не утвержденным IMA видам: “фторарфведсониту”, “ферроэкерманниту”, “феррофтор-экерманниту” и “феррифторнибенту” (табл. 1, электронное приложение, файл Литер_данные.xlsx), которые мы также включили в кадастровую таблицу (табл. 9, см. раздел “Обсуждение результатов”).

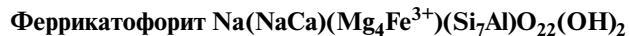
Рис. 6. Морфология феррикатофорита и феррифторкатофорита в породах Ловозерского щелочного массива. *a, b* – ксеноморфные выделения феррикатофорита в агрегатах темноцветных минералов, заполняющих интерстиции лейст альбитизированного КПШ; неравномернозернистый нефелиновый сиенит, пойкилитовый комплекс, 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. Куамдеспахк, обр. ЛВ-137/61 (аналитик А.В. Базай); *д* – участки феррикатофорита в диопсиде; фенитизированная вулканогенно-осадочная порода, г. Куйчорр, обр. ЛВ-125; *е* – феррифторкатофорит в ксенолите базальтового туфа, г. Куйчорр, обр. ЛВ-183/2. СЭМ, ВСЕ (обратно-рассеянные электроны) изображения. Fktp – феррикатофорит, Fflktp – 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 – ферросиликат, 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: феррикатофорит, феррифторкатофорит, 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.



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

двуваалентных катионов и Fe^{3+} среди трехваалентных катионов в группе C , (OH)-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 “магнезиоферрикатофоритом” и “магнезиокатофоритом” соответственно (табл. 2), что привело к путанице. Среди ранее опубликованных данных по амфиболам Ловозерского массива химических составов, отвечающих современной формуле феррикатофорита, 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. Аллуай (Mikhailova et al., 2019).

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

Характерные черты морфологии феррикатофорита в породах Ловозерского массива

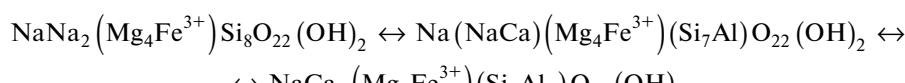
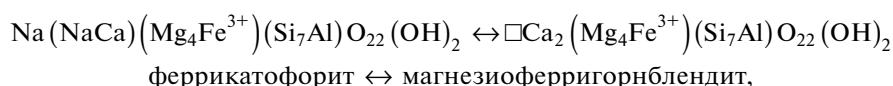
В породах пойкилитового комплекса феррикатофорит обычен в составе зернистых агрегатов совместно с флогопитом, эгирином, титанитом, ильменитом, лопаритом- (Ce) , которые заполняют интерстиции крупных лейст пертитового полевого шпата (рис. 6, *a, б*). В подобных агрегатах феррикатофорит, как правило, представлен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

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

Химический состав феррикатофорита в породах Ловозерского массива

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

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



магнезиоарфведсонит \leftrightarrow феррикатофорит \leftrightarrow 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

Компо-нент	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 $A_{0-1}B_2C_8T_8O_{22}W_2$
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	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
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 C	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 B	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 A	1.02	0.91	1.00	0.79	0.89	0.89	1.03	1.00	1.00	1.00	1.03
OH	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 – феррикатофорит, Ffktp – феррифторкатофорит, Rct – риихтерит, Frct – фторрихтерит.* Для всех анализов расчет к.ф. выполнен по алгоритму (Locock, 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. Куамдеспахк. 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. Куамдеспахк. Обр. ЛВ-137/9. ЕРМА.

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

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

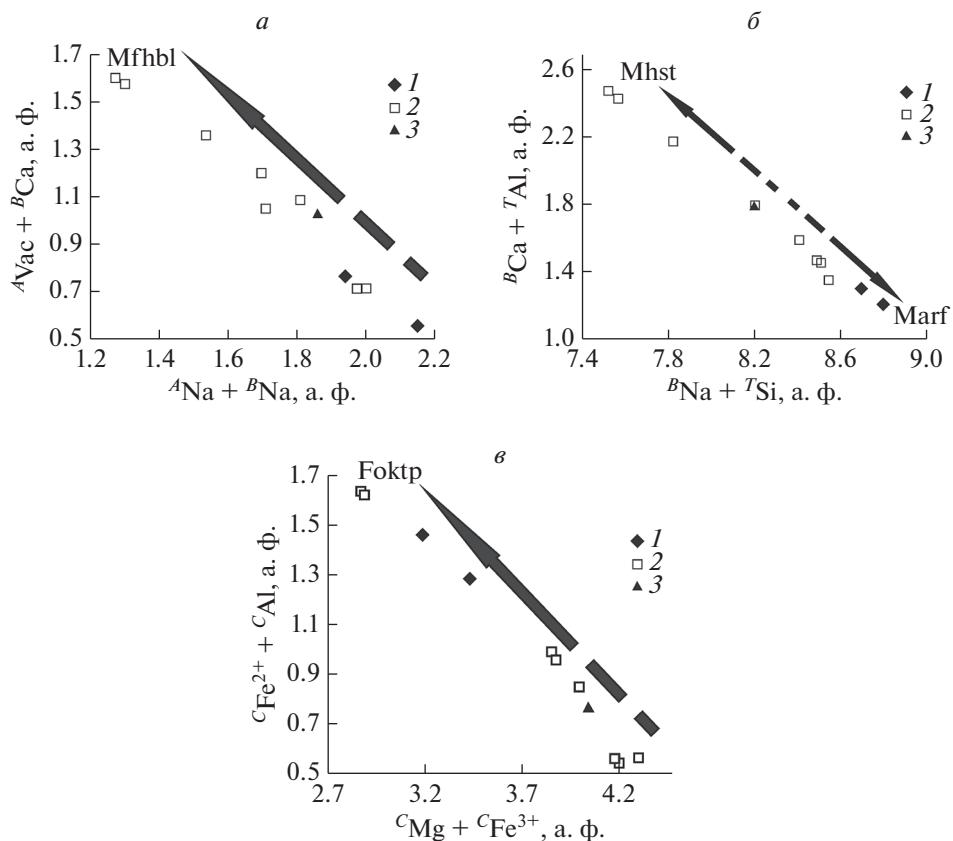
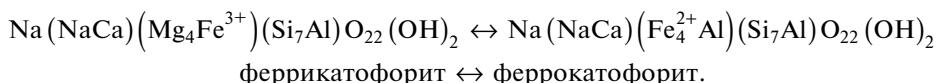
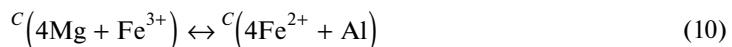


Рис. 7. Корреляция элементов при изоморфных замещениях в феррикатофорите и феррифторкатофорите. 1 – феррикатофорит из пород пойкилитового комплекса, 2 – феррикатофорит из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород, 3 – феррифторкатофорит из ксенолитов вулканогенно-осадочных пород. Mfhbl – магнезиоферригорнблендит.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

Fig. 7. Correlation of elements involved in isomorphic 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.

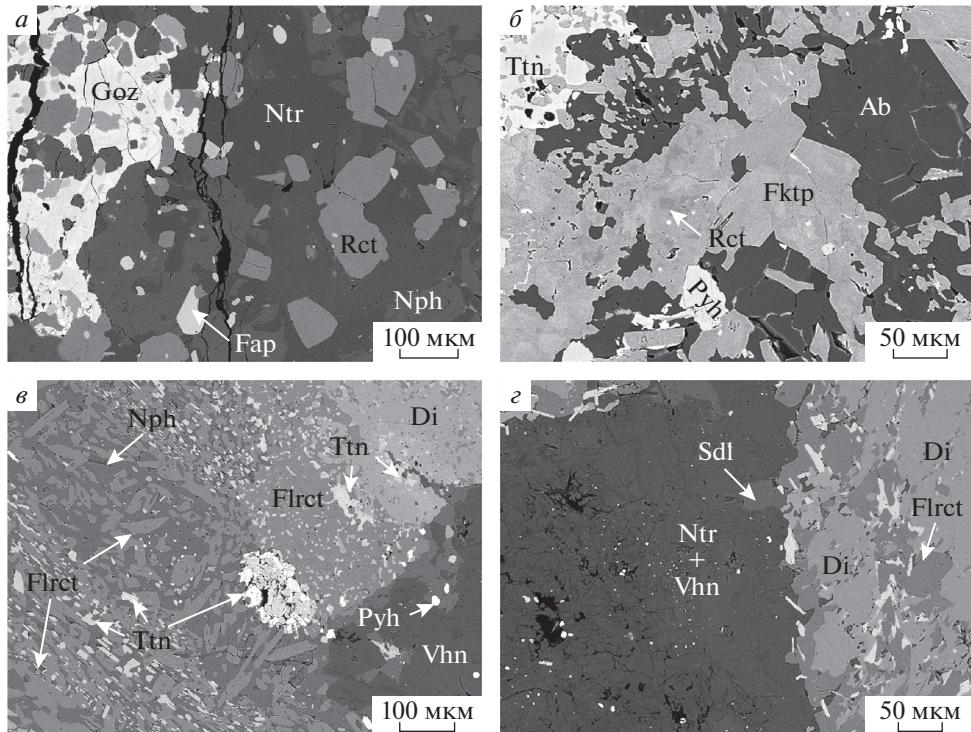


Рис. 8. Морфология рихтерита и фторрихтерита в породах Ловозерского щелочного массива. *а* – гипидиоморфные кристаллы рихтерита и их сростки; фенит, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-184А. *б* – участки рихтерита в неоднородных зернах феррикатофорита; ксенолит базальтового туфа, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-183/2. *в* – кристаллы фторрихтерита, *г* – включения и кайма фторрихтерита на кристалле диопсида; пойкилитовый вишневитовый сиенит, пойкилитовый комплекс, г. Сенгисчорр, обр. ЛВ-381. СЭМ, ВСЕ (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 fluorrichterite 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 MMA 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 амфиболя 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 ороговиковании 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).

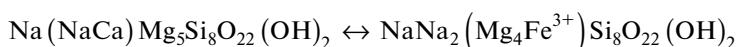
В составе рихтерита существенно варьируют содержания титана, алюминия, железа, калия и фтора (табл. 6, электронное приложение, файл Na-Ca-Amp.xlsx), что вполне закономерно, поскольку образование минерала происходило в различных обстановках – за счет разного исходного материала вулканогенно-осадочных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

Магний в рихтерите замещается железом:

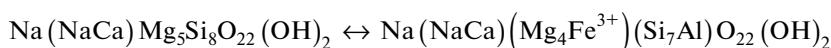


рихтерит \leftrightarrow феррорихтерит,

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



рихтерит \leftrightarrow магнезиоарфведсонит,

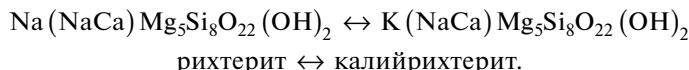


рихтерит \leftrightarrow феррикатофорит.

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

Минерал	Вулканогенно-осадочные породы
Актинолит	<ul style="list-style-type: none"> – метакварцит; – слабо фенитизированная вулканогенно-осадочная порода; – метаморфизованная вулканогенно-осадочная порода; – базальт; – метабазальт; – измененный оливиновый базальт; – оливиновый базальт; – оливиновый метабазальт
Эденит	<ul style="list-style-type: none"> – ультраосновная порода/фениты; – базальт; – оливиновый базальт; – вулканогенно-осадочная порода
Паргасит	<ul style="list-style-type: none"> – фенит
Гастингсит	<ul style="list-style-type: none"> – фенитизированный аннито-анортоклазовый роговик
Магнезиогастингсит	<ul style="list-style-type: none"> – фенитизированный аннито-анортоклазовый роговик
Магнезиоферри-горнблендит	<ul style="list-style-type: none"> – метабазальт; – оливиновый метабазальт; – туффит; – базальт; – измененный оливиновый 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 амфиболовом. По составу фторрихтерит сходен с рихтеритом, отличаясь доминированием фтора в анионной группе *W* стандартной формулы амфиболов.

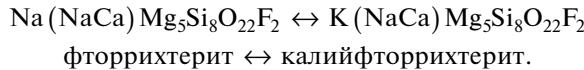
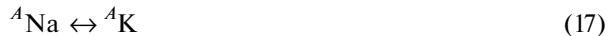
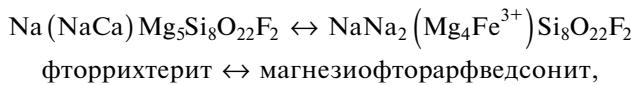
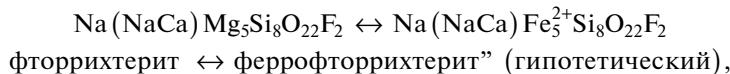
В Ловозерском массиве фторрихтериту соответствуют два из опубликованных ранее анализов амфиболов (Герасимовский и др., 1966; табл. 1, БД 1155, 932). Нами фторрихтерит установлен в пойкилитовом фельдшпатоидном сиените пойкилитового комплекса (табл. 5), что расширяет круг пород Ловозерского массива, содержащих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

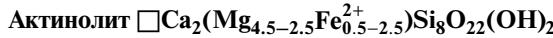
(рис. 8, *в*). Фторрихтерит установлен также в виде включений в краевой зоне и внешней каймы крупного кристалла диопсида (рис. 8, *г*).

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 видеообразующего элемента, кремния, напротив, высокое, демонстрирует почти полное заполнение тетраэдрической позиции с крайне незначительным вхождением в нее алюминия (табл. 6).

КАЛЬЦИЕВЫЕ АМФИБОЛЫ



Актиноолит является промежуточным членом ряда tremolит $\square\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ – ферроактиноолит $\square\text{Ca}_2\text{Fe}_5^{2+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, но традиционно сохраняется в номенклатурах амфиболов в силу своей петрологической значимости и укоренившегося положения в геологической литературе. Согласно действующей номенклатуре амфиболов (Hawthorne et al., 2012), химические составы актиноолита 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 актиноолита, по данным электронно-зондового анализа, в ксенолитах пород трапповой формации в Ловозерском массиве указано в работе (Корчак и др., 2011). Нами актиноолит также установлен исключительно в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород (табл. 7).

Характерные черты морфологии актиноолита в породах Ловозерского массива

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

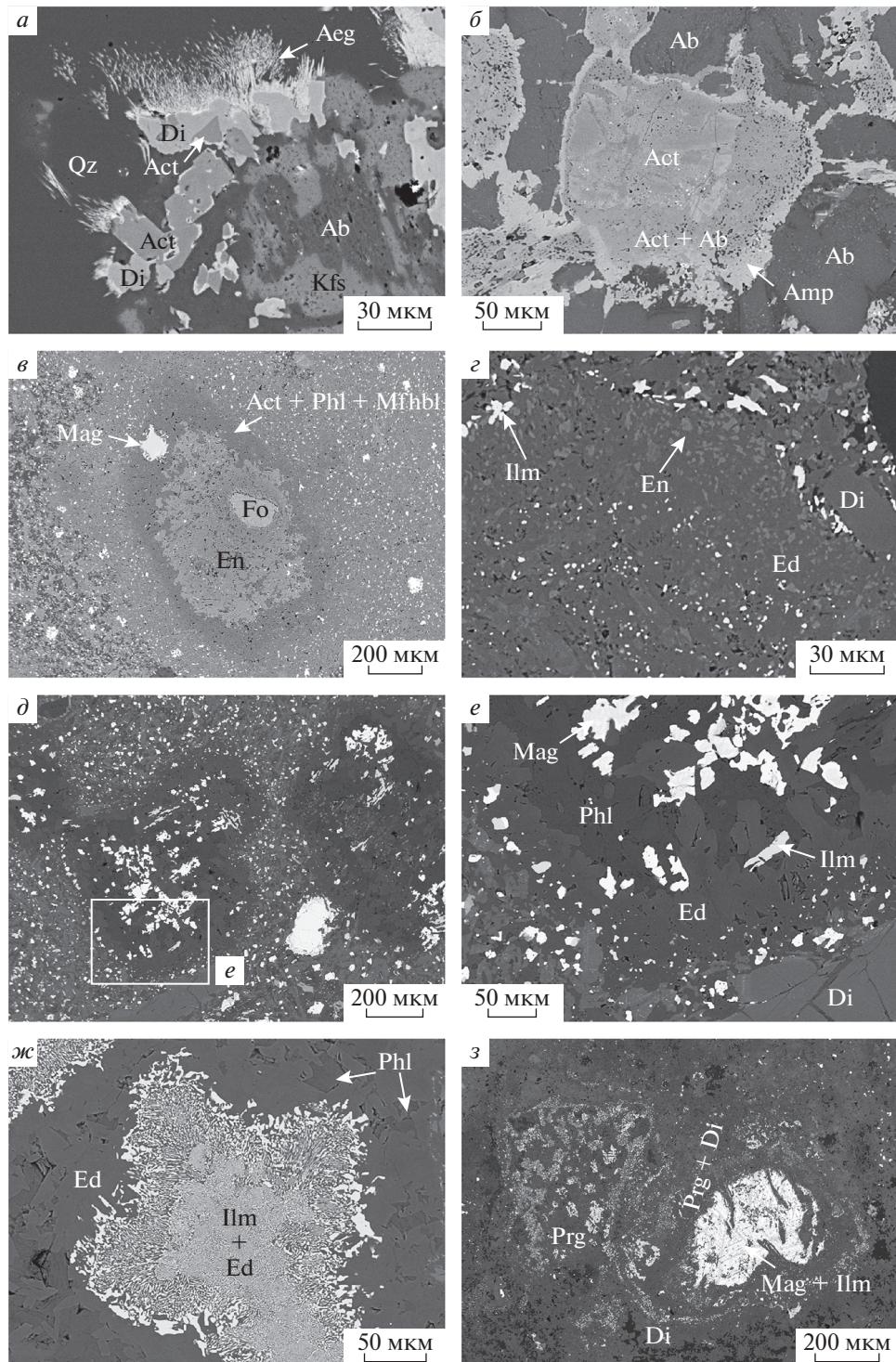


Рис. 9. Морфология актинолита, эденита и паргасита в породах Ловозерского массива. *а* – гипидиоморфные кристаллы актинолита и его ксеноморфные зерна в диопсиде; метакварцит, г. Киткюн, обр. ЛВ-01-51 II; *б* – ксеноморфные зерна актинолита с внутрифазовой (химической) и фазовой (включения альбита в зонах пойкилитового строения) неоднородностью, обрастающие каймами амфиболя 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. Куамдеспахк, обр. ЛВ-137/5; *д, е* – кайма эденита вокруг флогопит-магнетит-ильменитового агрегата, *ж* – ильменит-эденитовый симплексит 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, ВСЕ (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 срастаниями актинолита с флогопитом и магне-зиоферригонбллендитом 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: $c_{\text{Fe}^{2+}} = 0.66\text{--}1.86$ а. ф., $c_{\text{Mg}} = 2.64\text{--}4.18$ а. ф. (электронное приложение, файл Ca-Amp.xlsx). Наибольший изоморфизм актинолита проявлен в сторону “роговых обма-

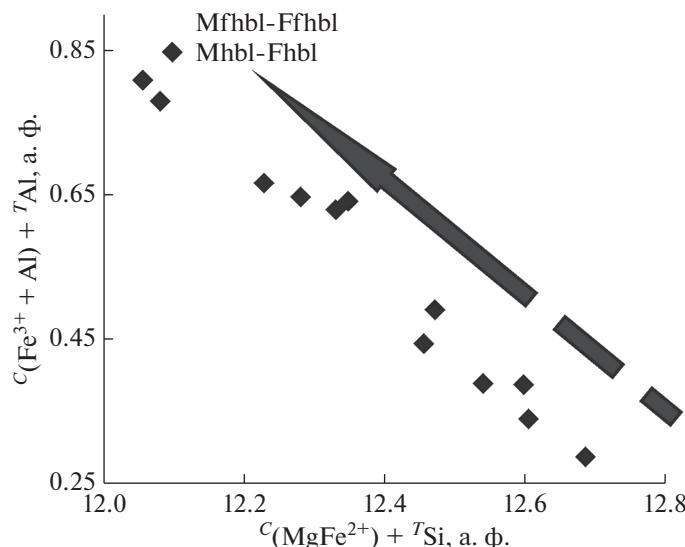


Рис. 10. Корреляция элементов при многокомпонентном изоморфизме в актинолите. Mhbl – магнезиогорнбллендит, Ffhl – ферроферригорнбллендит, Mhbl – магнезиогорнбллендит, Fhbl – феррогоргонбллендит.

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

Таблица 8. Химический состав (мас. %) минералов подгруппы Ca-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

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
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
OH	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. Куамдеспахк. Обр. ЛВ-137/5. AZtec.

267 – метаморфизованная вулканогенно-осадочная порода, г. Страшемпахк. Обр. ЛВ-01-35. EPMA.

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

115 – базальт, г. Куамдеспахк. Обр. ЛВ-137/5. EPMA.

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

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

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

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

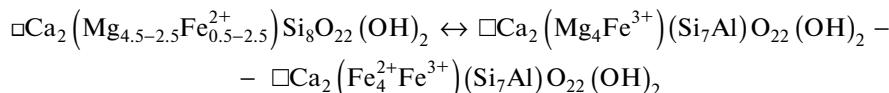
332, 333 – фенитизированный аннито-анортоклазовый роговик, г. Куйвчорр. Обр. ЛВ-117. AZtec.

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

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

1174 – оливиновый метабазальт, г. Пялкимпорр. Обр. ЛВ-01-32-2. EPMA.

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



актинолит \leftrightarrow магнезиоферригорнблендит – ферроферригорнблендит,

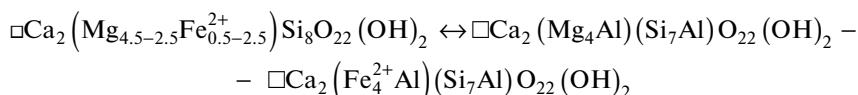


Таблица 9. Кадастр амфиболов Ловозерского массива
Table 9. Cadastre of amphibole group minerals in the Lovozero alkaline massif

Минеральный вид/ Mineral species	Распростра- ненность	Комплексы и породы	Объекты или привязка	Источник (первые данные)
Группа натриевых амфиболов				
Магнезиоарфведсо- нит/Magnesio-arfved- sonite	Пордообразу- ющий минерал	Все породы и пегмати- ты	Повсеместно	Хомяков, 1990; наши данные
Калийарфведсо- нит/Potassic-arfved- sonite	Две находки	Пегматит Ксенолиты вулкано- генно-осадочных по- род	г. Кедыквыр- пахк г. Куамдес- пахк	Pekov et al., 2004 Наши данные
Магнезиофторарфвед- сонит/Magnesio-fluo- ro-arfvedsonite	Одна находка	Альбититы	г. Сэлсурт	Бондарева и др., 1959
	Часто встреча- ющейся	Уртит, фойяит, амфи- боловый и эвдиалито- вый луявит	Не указан	Герасимовский и др., 1966
	Часто встреча- ющейся	Уртит (дифференциро- ванный комплекс), лу- явит (эвдиалитовый комплекс), ксенолиты вулканогенно-осадоч- ных пород	Более трех проявлений	Наши данные
Калиймагнезиоарф- ведсонит/Potassic-mag- nesio-arfvedsonite	Одна находка	Роговообманковые лу- явиты	г. Куамдес- пахк	Власов и др., 1959
Калиймагнезиофто- рарфведсонит/ Potassic-magnesio-fluo- ro-arfvedsonite	Одна находка	Пегматит	г. Лепхе- Нельм	Семенов, Ка- питонова, 1964
Арфведсо- нит/Arfvedsonite	Редкий	Пегматоидный фойяит луявит, эвдиалитовый комплекс	г. Сенгисчорр г. Аллуайв	Семенов, Ка- питонова, 1964; наши данные
Фторарфведсонит (гипотетический вид)/Fluoro-arfved- sonite	Одна находка	Амфиболовый луявит	г. Паргуайв	Волков и др., 1962
Экерманнит/ Eckermannite	Одна находка	Пегматит?	г. Куйчорр	Семенов, Ка- питонова, 1964
Ферроэкерманнит (гипотетический вид)/Ferro-eckerman- nite	Одна находка	Пегматит	г. Кедыквыр- пахк	Власов и др., 1959
Феррофторэкерман- нит (гипотетический вид)/Ferro-fluoro-eck- ermannite	(?)	Дифференцированный комплекс	Более трех проявлений	Волков и др., 1962
Феррифторнибейт (гипотетический вид)/Ferri-fluoro-pu- boite	Одна находка	Уртит	г. Нинчурт	Власов и др., 1959

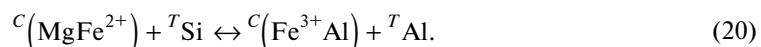
Таблица 9. Окончание

Минеральный вид/ Mineral species	Распростра- ненность	Комплексы и породы	Объекты или привязка	Источник (первые данные)
Группа натрий-кальциевых амфиболов				
Феррикатофо- рит/Ferri-katophorite	Широко рас- пространен	Ксенолиты вулкано- генно-осадочных по- род, пойкилитовый комплекс	Более трех проявлений	Наши данные
Феррифторкатофо- рит/Ferri-fluoro-kato- phorite	Редкие находки	Пегматит Фенитизированный ба- зальтовый туф	г. Сенгисчорр г. Куйвчорр	Семенов, Ка- питонова, 1964 Наши данные
Рихтерит/Richterite	Редкие находки Часто встреча- ющийся	Пегматит Ксенолиты вулканоген- но-осадочных пород	г. Аллуайв г. Куйвчорр	Хомяков, 1986 Наши данные
Фторрихтерит/ Fluoro-richterite	Редкие находки	Амфиболовый луявит Пойкилитовый вишне- витовый сиенит	Не указан г. Сенгисчорр	Герасимовский и др., 1966 Наши данные
Группа кальциевых амфиболов				
Актинолит/Actinolite	Часто встреча- ющейся	Ксенолиты вулканоген- но-осадочных пород	Более трех проявлений	Наши данные
Эденит/Edenite	Часто встреча- ющейся	Ксенолиты вулканоген- но-осадочных пород	Более трех проявлений	Наши данные
Паргасит/Pargasite	Одна находка	Ксенолиты вулканоген- но-осадочных пород	г. Сэлсурт	Наши данные
Гастингсит/Hastingsite	Одна находка	Ксенолиты вулканоген- но-осадочных пород	г. Куйвчорр	Наши данные
Магнезиогастинг- сит/Magnesio-hastingsite	Одна находка	Ксенолиты вулканоген- но-осадочных пород	г. Куйвчорр	Наши данные
Магнезиоферригорнбл- лендит/Magnesio-ferrit- hornblende	Часто встреча- ющейся	Ксенолиты вулканоген- но-осадочных пород	Более трех проявлений	Наши данные



актинолит \leftrightarrow магнезиогорнбллендит – феррогорнбллендит.

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 входжение 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).

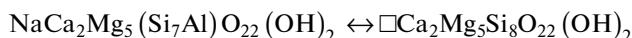
В Ловозерском массиве эденит (по данным электронно-зондового анализа) указан среди амфиболов, развивающихся по диопсиду в измененных вулканогенно-осадочных породах трапповой формации (Корчак и др., 2011). Нами минерал также установлен в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород (табл. 7).

Характерные черты морфологии эденита в породах Ловозерского массива

Эденит, наряду с флогопитом, минералами группы каолинита–серпентина, клинокхлором, 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, г). 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).

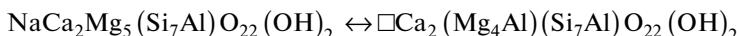
Химический состав эденита в породах Ловозерского массива

Химический состав эденита характеризуется значительными колебаниями содержаний таких видеообразующих 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 tremolитом:



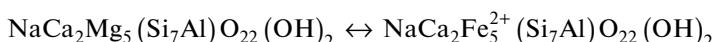
эденит \leftrightarrow tremolит.

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



эденит \leftrightarrow магнезиогорнблендит.

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



эденит \leftrightarrow ферроэденит.

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

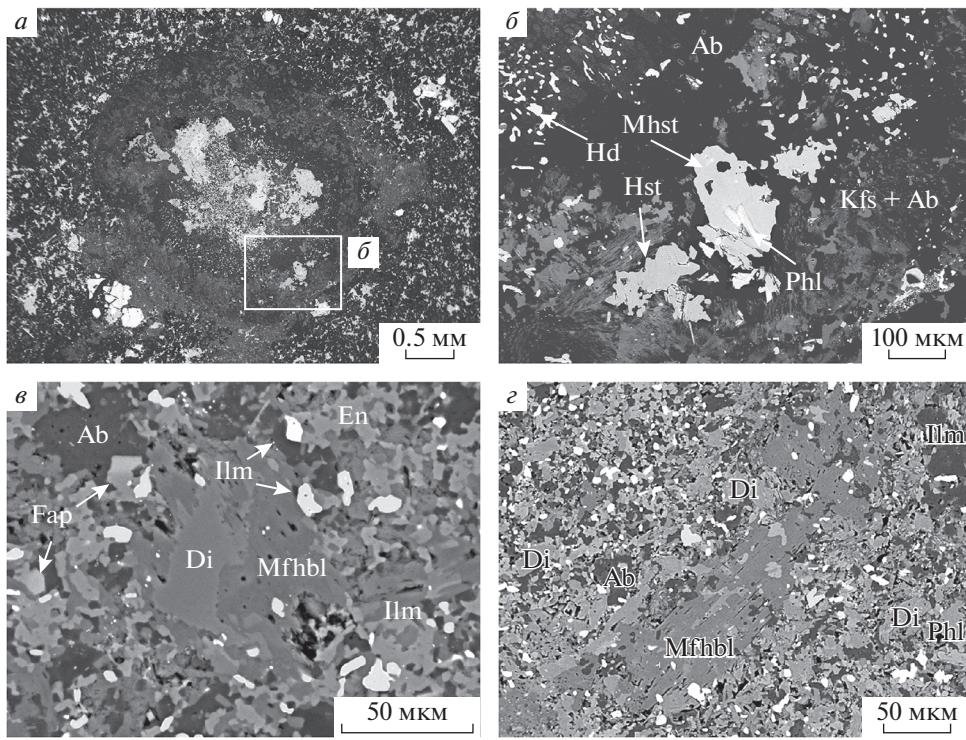


Рис. 11. Морфология гастингсита, магнезиогастингсита и магнезиоферригорнблендита в породах Ловозерского массива. *a, б* – ксеноморфные зерна гастингсита и магнезиогастингсита; фенитизированный аннито-аортоклазовый роговик, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-117; *в* – магнезиоферригорнблендит, обрастающий реликты диопсида; базальт, г. Куамдеспах, обр. ЛВ-137/4; *г* – гипидиоморфный кристалл магнезиоферригорнблендита; метабазалт, г. Куйвчорр, обр. ЛВ-131. СЭМ, ВСЭ (обратно-рассеянные электроны) изображения. Hst – гастингсит, Mhst – магнезиогастингсит, Hd – геденбергит, Kfs – калиевый полевой шпат, Mfhbl – магнезиоферригорнблендит, 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 Lovozer 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-группы в *W*. Этот минеральный вид присутствует во всех номенклатурах амфиболов без изменений (Leake, 1978; Leake et al., 1987; Hawthorne et al., 2012).

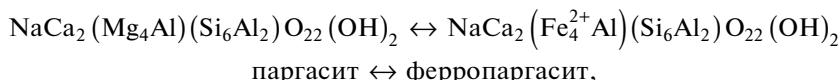
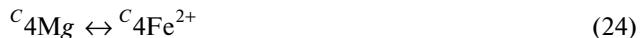
Подобно описанному выше актинолиту, паргасит упоминался в работе (Корчак и др., 2011) и установлен только в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород трапповой формации (табл. 7).

Характерные черты морфологии и химический состав паргасита в породах Ловозерского массива

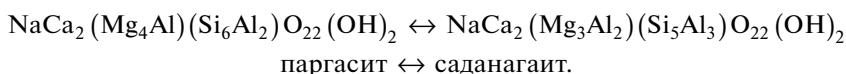
Надежно диагностированный паргасит наблюдался в виде ксеноморфных зерен, образующих совместно с диопсидом, альбитом, титанитом, флогопитом и другими

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 парагасита (табл. 8) отметим примесь железа — проявление изовалентного изоморфизма с ферропаргаситом:



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



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 *A*, железа среди двух- и трехвалентных катионов группы *C*, OH-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, пargasитом, аннитом, флогопитом, флюоритом, диопсидом, фторапатитом, фторбритолитом-(Ce), калиевым полевым шпатом и альбитом, образующими концентрически-зональные агрегаты в тонкозернистой основной массе породы (рис. 11, *a, б*).

В составе гастингсита отметим крайне незначительное преобладание двухвалентного железа над магнием в группе *C*, 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, *a, б*), точная диагностика возможна только по данным химического состава (табл. 8).

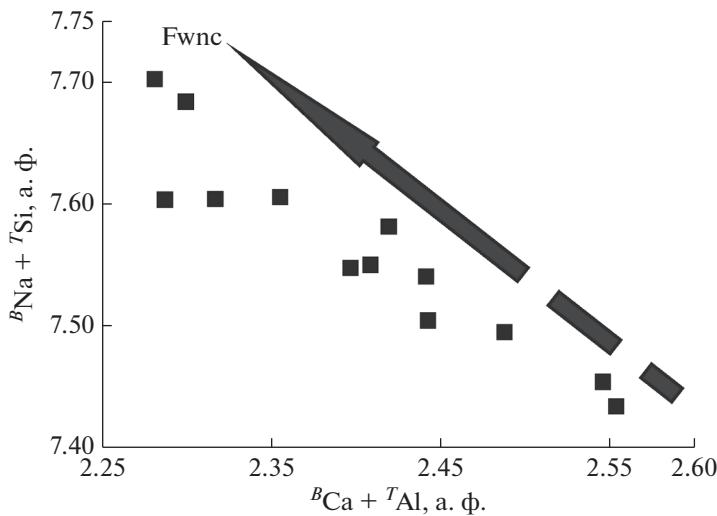


Рис. 12. Корреляция элементов при гетеровалентном изоморфизме в магнезиоферригорнблендите. Fwnc – ферривинчит.

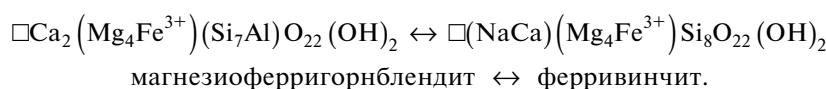
Fig. 12. Correlation of elements in heterovalent isomorphic replacements for magnesio-ferri-hornblendite.

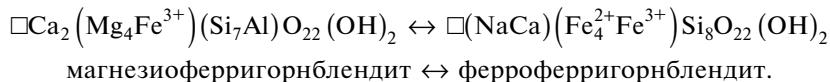
Магнезиоферригорнблендит $\square \text{Ca}_2(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Магнезиоферригорнблендит как самостоятельный минеральный вид утвержден КНМНК MMA 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 C, OH-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 зернами и гипидоморфными кристаллами, часто находящимися в тесной пространственной и, вероятно, генетической связи с диопсидом и флогопитом (рис. 11, в, г). Индивиды магнезиоферригорнблендита могут содержать включения энстатита, ильменита, флогопита, альбита, в краевых зонах – вrostки 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 ферривинчитом и изовалентного с ферроферригорнблендитом (схема (27)).





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 распространеными в породах Ловозерского массива. Авторами надежно диагностированы четыре минеральных вида: магнезиоарфведсонит, магнезиофорарфведсонит, 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 (Pekov et al., 2004). В химическом составе натриевых амфиболов проявлены широкие вариации содержания videoобразующих 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 породообразующих 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, эгирину-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” OH/F – доминирующих видов: феррикатофорит и рихтерит. Это связано с заметным накоплением фтора в среде минералообразования при формировании пород пойкилитового комплекса, которые рассматриваются в качестве “предпегматитовых” 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 смешены 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 видеообразующих 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 амфибola 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 возможности 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 РНФ № 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.** Фтормагнезиоарф-ведесонит $\text{NaNa}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_4\text{Fe}^{3+}[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{F},\text{OH})_2$ – 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 щелочный массив: породы, пегматиты, минералогия, геохимия и генезис. М.: Изд-во АН СССР, **1959.** 623 с.
- Волков В.П., Поляков А.И., Карабанова 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-мелтейгит 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 порфировидных луявитров г. Паргуйев (Ловозерский массив). “Геохимия магматических пород” // Материалы XXV Все-российского 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.** Траповая 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 амфиболам Комиссии по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации (КНМММ ММА) // 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 ультраагпайтовых щелочных пород. М.: Наука, **1990.** 196 с.
- Шаблинский Г.Н.** К вопросу о глубинном строении Хибинского и Ловозерского plutонов // Труды Ленинградского общества естествоиспытателей. **1963.** Т. 74. № 1. С. 41–43.

Amphibole Supergroup Minerals in the Lovozerо 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 Lovozerо 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 Lovozerо 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 (Il'meny-Vishnevye 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 (CNCMC). 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., Oberli 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 (CNMMN). *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 Mn²⁺ 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)(Mg₄Fe³⁺)(Si₇Al)O₂₂F₂. *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.* Potassicarfedsonite, KNa₂Fe₄²⁺Fe³⁺Si₈O₂₂(OH)₂, a K-dominant amphibole of the arfvedsonite series from agpaitic 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-Hornblendite \square Ca₂(Mg₄Fe³⁺)[(Si₇Al)O₂₂](OH)₂ as a Potentially New Mineral of the Amphibole Supergroup. *Doklady Chemistry.* **2016.** Vol. 470. P. 245–251.