

Нептунит из Ловозерского массива, Кольский полуостров

Селиванова Е. А.¹, Лялина Л. М.¹, Пахомовский Я. А.^{1,2}, Яковенчук В. Н.^{1,2}

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, e.selivanova@ksc.ru

² Центр наноматериаловедения ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация. В Ловозерском массиве установлено присутствие редкого акцессорного минерала нептунита в породах эвдиалитового (фойяиты) и дифференцированного (уртиты) комплексов, в лопарититах, а также в пегматитовой жиле «Сиреневая» г. Аллуайв.

Минерал является одним из поздних по времени кристаллизации, как в магматических породах, так и в пегматитах. Анализ химического состава нептунита показал широкий Fe↔Mn изоморфизм вплоть до границы с манганонептунитом, и высокую вероятность частичной неупорядоченности между катионными позициями Fe и Ti, с одной стороны, и позициями Fe и щелочных металлов (Na, Li), с другой.

Наиболее железистый и наиболее упорядоченный нептунит характерен для пегматитовых тел.

Ключевые слова: нептунит, щелочные породы, пегматит, Ловозерский массив, Кольский полуостров.

Neptunite from the Lovozero massif, Kola peninsula, Russia

Selivanova E. A.¹, Lyalina L. M.¹, Pakhomovsky Y. A.^{1,2}, Yakovenchuk V. N.^{1,2}

¹ Geological Institute FRC KSC RAS, Apatity, e.selivanova@ksc.ru

² Nanomaterials Research Center KSC RAS, Apatity

Abstract. A rare accessory mineral neptunite was found in the Lovozero massif in rocks of Eudialyte complex (foyaite), Layered complex (urtites), in loparites, as well as in pegmatite «Sirenevaya», Mt. Alluaiv. The mineral is one of the latest in terms of crystallization time, both in igneous rocks and in pegmatites.

Analysis of the chemical composition of neptunite showed a wide Fe↔Mn isomorphism up to the boundary with manganoneptunite and a high probability of partial disorder in cationic positions between Fe and Ti on the one hand, and Fe and alkali metals (Na, Li) on the other.

The most ferruginous and most ordered neptunite belongs to the pegmatite bodies.

Key words: neptunite, alkaline rocks, pegmatite, Lovozero massif, Kola Peninsula.

Введение

Все представители группы нептунита – магнезионептунит, манганонептунит, нептунит и ватацумит, являются редкими акцессорными минералами, встречающимися в разнообразных геологических обстановках: щелочных магматических породах, связанных с ними пегматитах и гидротермальных жилах, фенитах, метаморфических породах (Бонштедт, 1924; Heinrich, Quon, 1963; Laird, Albee, 1972; Slansky, Glen, 1982; Задов и др., 2011 и др.). Кажущаяся, по данным сайта mindat.org, распространенность собственно нептунита в действительности часто является лишь упоминанием минерала в публикациях, не подтвержденным какими-либо исследованиями (Lustrino et al., 2012; Чуканов и др., 2004 и др.). Число достоверных находок нептунита невелико (табл. 1), что сохраняет за минералом статус редкого.

Как в Хибинском, так и в Ловозерском массиве установлены нептунит и манганонептунит, при этом последний распространен значительно шире. Манганонептунит $\text{KNa}_2\text{LiMn}^{2+}_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}$ присутствует в пегматитовых образованиях обоих массивов, в фойяитах внешней части Хибинского массива, в породах дифференцированного и эвдиалитового комплексов Ловозерского массива (Яковенчук и др., 1999; Пеков, 2001). Для нептунита же $\text{KNa}_2\text{LiFe}^{2+}_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}$ к настоящему времени известны единичные достоверные находки: в натролитизированной эгирино-нефелино-микроклиновой жиле № 33 в уртиты г. Кукисвумчорр Хибинского массива (Пеков, Podlesnyi, 2004) и в пегматите № 45, залегающем в нозеановых сиенитах г. Лепхе-Нельм (Семёнов, 1972), а также в виде включений в лопарите из уртитов г. Карнасурт (Mikhailova et al., 2023) Ловозерского массива.

Таблица 1. Достоверные находки нептунита
Table 1. Neptunite locality list

Месторождение	Порода	Ссылка
Нарсарсук, Гренландия (первая находка, <i>type locality</i>)	Щелочной пегматит	Flink, 1893
Сан-Бенито, Калифорния, США	Натролитовые жилы в глаукофановых сланцах	Ford, 1909; Bradley, 1909; Laird, Albee, 1972
Хан-Богдо, Монголия	Щелочногранитный пегматит	Золотарев и др., 2016
Карлингфорд, Ирландия	Кварцевые сиениты	Nockolds, 1950
Вудсриф, Австралия	Серпентинит	Slansky, Glen, 1982
Посус-ди-Кальдас	Щелочные породы (тингуаиты, фонолиты, нефелиновые сиениты)	Gomes et al., 2023
Хибинский массив	Щелочные породы	Яковенчук и др., 1999
Ловозерский массив	Щелочные породы	Пеков, 2001; Mikhailova et al., 2023
Мон Сент-Илер, Квебек, Канада	Фенит	Horváth et al., 2019
Дара-и-Пиоз, Таджикистан	Щелочной гранит	Дусматов, Кабанова, 1967

В пегматите № 45 нептунит развит в микроклиновой и натролитовой зонах, где представлен короткопризматическими и изометричными кристаллами в ассоциации с Mn-содержащим «апатитом» и тайниолитом. Реже нептунит замещает лоренценит, лампрофиллит, шизолит, минералы группы эвдиалита в краевых частях их индивидов, или заполняет трещины в микроклине. От манганонептунита минерал отличается более светлой буровато-красной окраской. Основанием для отнесения минерала к нептуниту послужило низкое содержание MnO – 3.21 мас. %, с соотношением Mn/Fe, равным ~ 0.2, однако полный химический состав не приводится (Семенов, 1972). Результаты более поздних исследований И. В. Пекова, сопровождаемые химическим анализом, подтвердили присутствие минерала в указанном пегматите (Пеков, 2001). Иные упоминания нептунита в Ловозерском массиве, например (Сорохтина и др., 2004), нельзя считать достоверными из-за отсутствия данных химического состава минерала.

Дополнительная путаница в истории минерала существует из-за того, что в ряде опубликованных работ нептунит и манганонептунит не разделяются. Например, структурные исследования «нептунита» (Борисов и др., 1965) в действительности выполнены для манганонептунита из Ловозерского массива. Результаты работ по кристаллохимии именно Fe-доминантных минеральных фаз рассматриваемого ряда, но из других массивов (Cannilo et al., 1966; Kunz et al., 1991, Золотарев и др., 2016), выявили катионное упорядочение в цепочках октаэдров кристаллической структуры, с нецентросимметричной пр. гр. Сс.

В настоящей работе впервые представлены результаты изучения нептунита из собственно магматических пород массива, приведены новые данные по минералогии нептунита в пегматито-гидротермальных телах.

Краткая геолого-петрографическая характеристика Ловозерского массива

Строению Ловозерского массива, описанию и классификации слагающих его пород посвящено большое количество публикаций, в том числе крупные обобщающие монографии (Буссен, Сахаров, 1958, 1972; Власов и др., 1959; Шаблинский, 1963; Герасимовский и др., 1966; Пеков, 2001; Arzamastsev et al., 2013 и др.).

Ловозерский массив, расположенный в западной части Кольского полуострова среди архейских гранито-гнейсов, является одним из крупнейших щелочных массивов мира. Он сложен разнообразными фельдшпатоидными сиенитами и фойдолитами и содержит многочисленные ксенолиты вулканогенно-осадочных пород, интенсивно фенитизированные и, местами, ороговикованные.

В строении массива выделяют три крупных комплекса пород: дифференцированный, эвдиалитовый и пойкилитовый (рис. 1). Дифференцированный комплекс слагает нижнюю часть массива

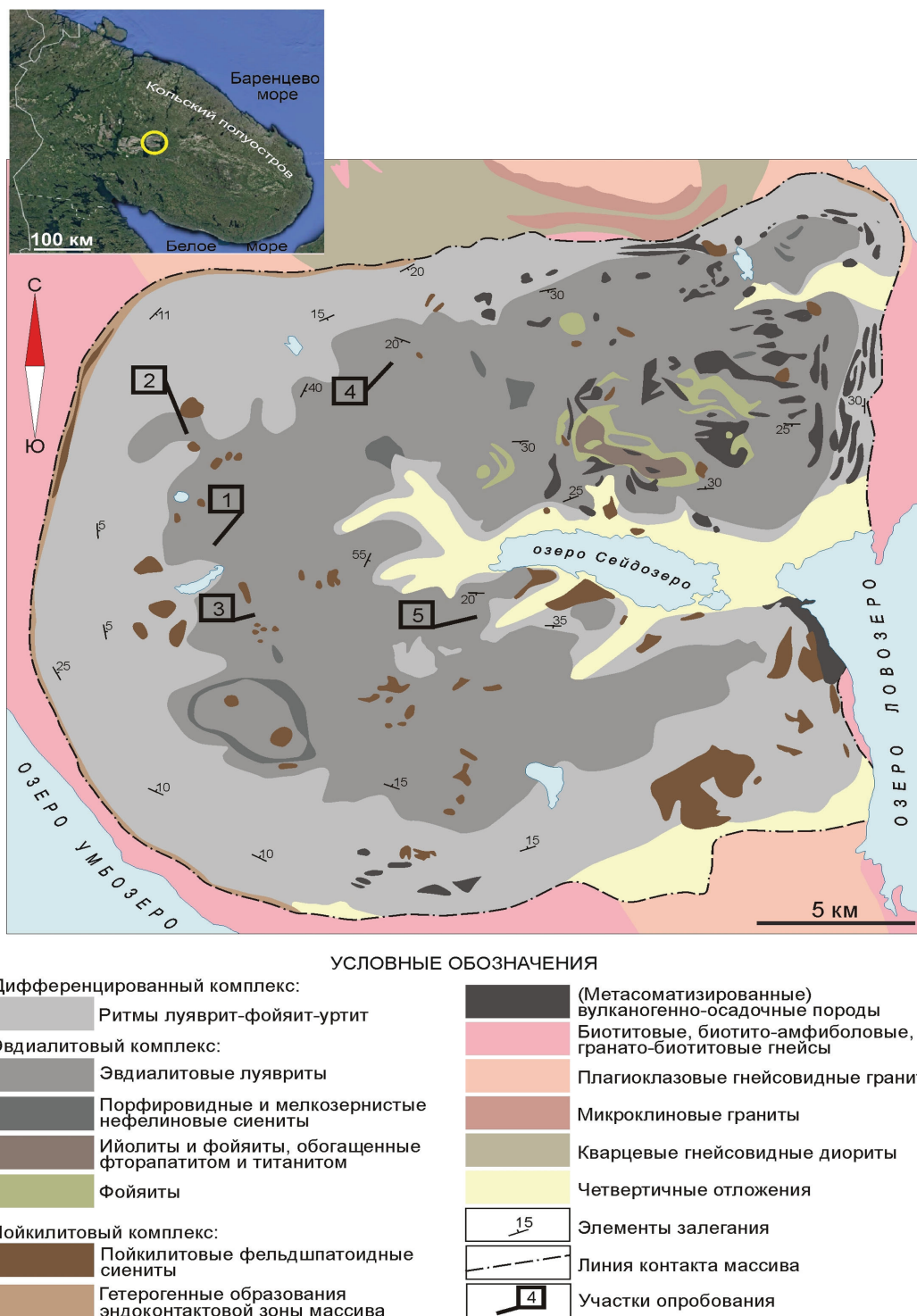


Рис. 1. Расположение Ловозерского массива в пределах Кольского полуострова (вверху слева, спутниковый снимок, Landsat/Copernicus IBCAO) и геологическая схема массива по (Сапрыкина и др., 1977), с упрощениями. Участки опробования пород: 1 – г. Ангвундасчорр, фойяит, эвдиалитовый комплекс; 2 – г. Аллуайв, луаврит, фойяит, эвдиалитовый комплекс, уртит, дифференцированный комплекс, жила «Сиреневая»; 3 – г. Сенгисчорр, фойяит, эвдиалитовый комплекс; 4 – г. Карнасурт, уртит, дифференцированный комплекс; 5 – г. Лепхе-Нельм, лопаритит, пегматитовые жилы № 45, 47

Fig. 1. The Lovozero massif location within the Kola Peninsula (top left, satellite image, Landsat/Copernicus IBCAO) and the geological scheme of the massif after (Saprykina et al., 1977). Rock sampling points: 1 – Angvundaschorr Mt, foyaite, Eudialyte Complex; 2 – Alluaiv Mt, luavrite, foyaite, Eudialyte Complex, urtite, Layered Complex, «Sirenevaya» pegmatite; 3 – Sengischorr Mt, foyaite, Eudialyte Complex; 4 – Karnasurt Mt, urtite, Layered Complex; 5 – Lepkhe-Nelm, loparite, pegmatite No. 45, 47

ва и состоит из множества слоев, или ритмов, образованных сменяющимися сверху вниз породами: луаврит – фойяит – уртит (ийолит) или луаврит – фойяит. Луавриты – мезо-/меланократовые нефелиновые сиениты трахитоидной структуры; фойяиты – массивные, реже со слабо выраженной трахитоидностью, лейкократовые нефелиновые сиениты; уртиты и ийолиты относятся к лейко- и мезократовым нефелиновым фойдолитам, соответственно.

Эвдиалитовый комплекс прорывает и перекрывает дифференцированный. Явно выраженная расслоенность для него не характерна. Обогащенные минералами группы эвдиалита (МГЭ) луавриты являются главными породами комплекса. Среди них закономерно расположены пластовые или линзовидные тела фойяитов, мелкозернистых и порфировидных нефелиновых сиенитов, редко – уртитов.

К пойкилитовому комплексу отнесены неравномернозернистые и пойкилитовые фельдшпатоидные сиениты, тела которых различной формы и размеров произвольно располагаются в дифференцированном и эвдиалитовом комплексах.

Ловозерский массив широко известен своим уникальным разнообразием минералов, включающим редкие и эндемичные виды, за что во многом отвечают пегматиты и гидротермальные жилы различного минерального состава (Семенов, 1972; Пеков, 2001).

Образцы и аналитические методы

В работе использована коллекция образцов и препаратов пород различных комплексов Ловозерского массива, собранная и предоставленная авторам для исследования сотрудниками Геологического института ФИЦ КНЦ РАН (г. Апатиты) – Ю. П. Меньшиковым, Г. Ю. Иванюком, В. Н. Яковенчуком, Ю. А. Михайловой, Я. А. Пахомовским, О. Д. Мокрушиной.

Оптические, электронно-микроскопические, электронно-зондовые исследования минералов проводились в комбинированных шлифах и искусственных аншлифах.

Диагностика минералов по химическому составу, изучение ассоциаций минералов и их взаимоотношений выполнены 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 рентгеновском электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA MS-46 (Франция) и при помощи системы AZtec. Результаты EPMA (Electron Probe Microanalysis) анализа минералов получены при ускоряющем напряжении 22 кВ и токе электронного зонда 30 нА. В качестве эталонов были использованы: лоренценит (Na, Ti), пироп (Mg, Al), волластонит (Si, Ca), гематит (Fe), вадейт (K), MnCO_3 (Mn), ZrSiO_4 (Zr), Nb металлический, барит (Ba).

Аббревиатуры минералов приведены согласно (Warr, 2021).

Морфология и минеральная ассоциация нептунита в Ловозерском массиве

В Ловозерском массиве нептунит обнаружен авторами в породах эвдиалитового и дифференцированного комплексов, в лопарититах, в пегматитовой жиле «Сиреневая» г. Аллуайв и в пегматите № 45 г. Лепхе-Нельм, где была его первоначальная находка.

В фойяите и луаврите эвдиалитового комплекса нептунит, как правило, ксеноморфен, имеет размеры до 100, реже 200 мкм, и совместно с альбитом, цеолитами, фазой близкой к рабдофану-(Ce) и идиоморфными призматическими кристаллами эгирина образует агрегаты в интерстициях породообразующих минералов – лейст альбитизированного калиевого полевого шпата и кристаллов нефелина (рис. 2 а). Реже в подобных агрегатах встречаются гипидиоморфные призматические кристаллы нептунита и их сростки (рис. 2 б).

В породах дифференцированного комплекса (уртиты) нептунит встречается реже и в более мелких индивидах размером до 60 мкм. Минерал представлен гипидиоморфными кристаллами и ксеноморфными зернами в агрегатах натролита, заполняющего интерстиции лейст калиевого полевого шпата и кристаллов нефелина.

Тесная ассоциация нептунита и лопарита наиболее явно выражена в лопаритите – породе, существенно обогащенной лопаритом, расположенной на контакте с уртитам в пределах г. Лепхе-

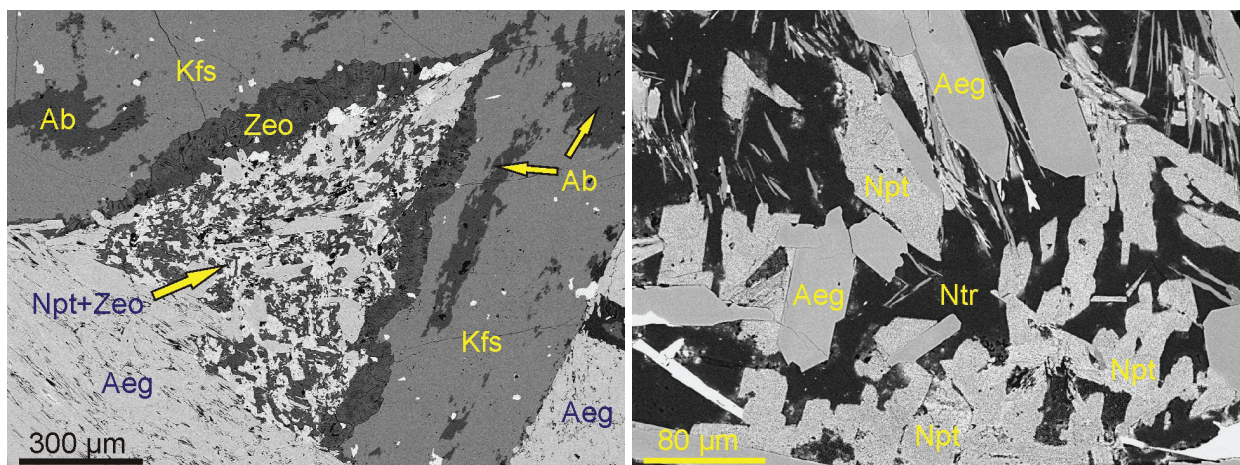


Рис. 2. а – нептунит-цеолитовый агрегат в интерстициях лейст калиевого полевого шпата и кристаллов эгирина, фойяит, эвдиалитовый комплекс, г. Ангвундасчорр. Обр. ЛВ-222; б – гипидиоморфные призматические кристаллы нептунита, фойяит, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-28/212. Обозначения: Npt – нептунит; Kfs – калиевый полевой шпат; Aeg – эгирин; Ntr – натролит; Zeo – минерал группы цеолитов (недиагностированы до минерального вида); Ab – альбит. СЭМ, BSE (Back-scattered electron) изображение

Fig. 2. a – Neptunite-zeolite aggregate in interstices of potassium feldspar and aegirine crystals in foyaite, Eudialyte Complex, Angvundaschorr. Sample LV-222; b – subhedral prismatic crystals of neptunite in foyaite, Eudialyte Complex, Alluaiv. Sample LV-28/212. SEM, BSE image: Npt – neptunite; Kfs – potassium feldspar; Aeg – aegirine; Ntr – natrolite; Zeo – mineral of the zeolite group (undiagnosed mineral species); Ab – albite

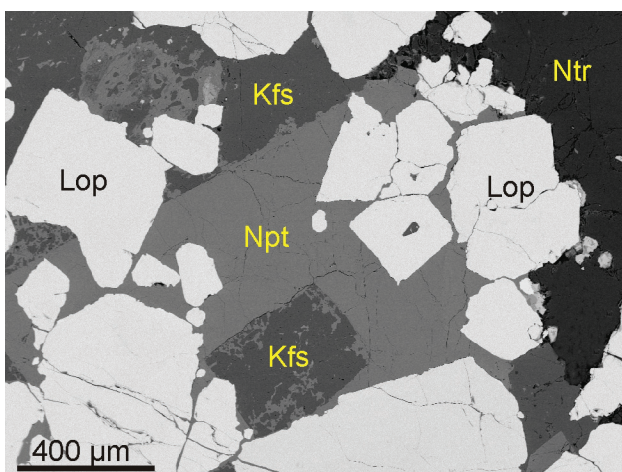


Рис. 3. Нептунит с включениями и вростками других минералов, лопаритит, г. Лепхе-Нельм. Обр. L-18-16-a2-2. Обозначения: Npt – нептунит; Lop – лопарит; Kfs – калиевый полевой шпат; Ntr – натролит. СЭМ, BSE изображение

Fig. 3. Neptunite morphology in the loparite-rich rock, Lovozero massif. SEM, BSE images: Npt – neptunite; Lop – loparite; Kfs – potassium feldspar; Ntr – natrolite

Нельм. Здесь непутнит представлен крупными выделениями, включающими в себя кристаллы лопарита, калиевого полевого шпата (рис. 3), заполняет интерстиции лопарита или образует мелкозернистые агрегаты с фторапатитом, паравиноградовитом, калиевым полевым шпатом, лампрофиллитом, рабдофаном (Ce) и др. Встречаются включения нептунита размером 50–200 мкм в кристаллах лопарита.

Пегматитовая жила «Сиреневая» г. Аллуайв, вскрытая выработками Умбозерского рудника в 1996 г., характеризуется поразительным минеральным разнообразием, общее число минеральных видов в ней достигло 65. Основную массу центральной части жилы составляет полиминеральный агрегат с преобладающим уссингитом, в котором ярко-красные кристаллы манганонептунита образуют скопления размером до 5 см (Пахомовский и др., 2005). В этой жиле обнаружены изометричные кристаллы нептунита размером 100–250 мкм и их скопления расположенные по границам волокнистых, сферолитоподобных агрегатов лоренценита и виноградовита с вмещающим их натролитом.

Внутрифазовая (химическая) неоднородность была выявлена в индивидах нептунита из уртитов дифференцированного комплекса и из пегматитов (табл. 2). В табл. 2 приведены наиболее представительные анализы нептунита из пород Ловозерского массива. Для построения диаграмм была использована полная выборка из 16 анализов.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) нептунита, Ловозерский массив
Table 2. Chemical composition (wt %) of neptunite from Lovozero massif

Компонент	Номер анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Na ₂ O	7.51	7.11	8.28	7.05	6.74	7.29	7.19	7.37	7.15
K ₂ O	4.86	5.07	5.17	4.68	4.87	5.17	5.76	4.88	4.89
CaO	0.10		0.05			0.06			
BaO									0.23
FeO	10.23	11.36	8.06	11.19	9.02	10.89	8.87	14.50	11.51
MnO	8.63	4.80	7.71	4.64	5.64	4.66	5.13	2.41	5.11
MgO		0.29	0.10	0.19		0.32	0.45	0.51	0.19
TiO ₂	14.40	14.67	17.46	16.05	16.86	16.58	18.81	15.24	16.43
Nb ₂ O ₅	0.74			0.47	0.40	1.15		0.18	0.14
SiO ₂	52.50	52.57	53.27	52.91	52.30	52.65	53.99	52.50	52.96
Al ₂ O ₃	0.42	0.49	0.17	0.14	0.44	0.33	0.10	0.09	0.22
Сумма	99.39	96.36	100.27	97.32	96.27	99.10	100.30	97.68	98.83
К. ф. на основе Si + Al = 8									
Na	2.20	2.08	2.40	2.06	1.98	2.13	2.06	2.17	2.08
K	0.94	0.97	0.99	0.90	0.94	0.99	1.09	0.95	0.94
Ca	0.02		0.01			0.01			
Ba									0.01
Fe ²⁺	1.29	1.43	1.01	1.41	1.14	1.37	1.10	1.84	1.45
Mn	1.10	0.61	0.98	0.59	0.72	0.60	0.64	0.31	0.65
Mg		0.07	0.02	0.04		0.07	0.10	0.12	0.04
Ti	1.63	1.66	1.97	1.82	1.92	1.88	2.09	1.74	1.86
Nb	0.05			0.03	0.03			0.01	0.01
Si	7.92	7.91	7.97	7.98	7.92	7.94	7.98	7.98	7.96
Al	0.08	0.09	0.03	0.02	0.08	0.06	0.02	0.02	0.04
Суммы к. ф. катионов									
[Fe]= Fe,Mn,Mg	2.39	2.11	2.01	2.04	1.86	2.04	1.84	2.27	2.14
[Ti]=Ti,Nb	1.68	1.66	1.97	1.85	1.95	1.88	2.09	1.75	1.87
[Fe]+ [Ti]	4.07	3.77	3.98	3.89	3.81	3.92	3.93	4.02	4.01

Примечание. Анализы (ЕРМА): 1 – фоййит, эвдиалитовый комплекс, г. Ангвундасчорр. Обр. ЛВ-222; 2 – переходная порода луаврит/фоййит, эвдиалитовый комплекс, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-222-259; 3 – уртит, дифференцированный комплекс, г. Аллуайв. Обр. ЛВ-335/3; 4 – уртит, дифференцированный комплекс, г. Карнасурт. Обр. ЛВ-III-6-1; 5 – лопаритит, г. Лепхе-Нельм. Обр. L-18-16-a2-2; 6 – лопаритит, г. Лепхе-Нельм. Обр. L-18-16-a2-3; 7 – пегматитовая жила «Сиреневая», г. Аллуайв. Обр. ЛВ-077; 8, 9 – кристалл из пегматита № 45, г. Лепхе-Нельм, центральная и краевая зоны соответственно. Обр. ЛВ-101.

Химический состав нептунита из Ловозерского массива

По содержанию видообразующего элемента, железа, нептунит из Ловозерского массива проявляет широкие вариации от составов, граничащих с манганонептунитом, в урритах дифференцированного комплекса (табл. 2, ан. 3) до почти чистого нептунита из пегматита № 45 г. Лепхе-Нельм (табл. 2, ан. 8, рис. 4 а). В целом, видна тенденция к росту отношения Fe/Mn в нептуните из магматических к пегматитовым породам.

Зависимость Fe/Mn, отражающая конкуренцию элементов в позиции [Fe] кристаллической структуры, выражена, но не столь отчетливо, как можно было бы предположить (рис. 4, а). Отклонение составов от стехиометрического $\text{KNa}_2\text{Li}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn})_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}$ (пунктирная линия $(\text{Fe} + \text{Mn}) = 2$ на рис.)

нельзя объяснить незначительным вкладом примеси магния. Подобные отклонения могут быть связаны с частичной неупорядоченностью заполнения катионных позиций [Fe] и [Ti]. Иными словами, для составов, лежащих выше линии $(\text{Fe} + \text{Mn}) = 2$, возможно вхождение избыточных двухвалентных катионов в октаэдрические позиции титана. Такие замещения более вероятны с участием железа, особенно для его окисной формы, близкой по кристаллохимии к титану: $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Ti}^{4+}$. Для точек, лежащих ниже линии, наоборот, возможно вхождение титана в позицию железа/марганца. Такая ситуация очевидна для анализа 7 из табл. 2, в котором а. ф. Ti = 2.09, что превышает идеальное значение 2.

Описанная частичная неупорядоченность хорошо прослеживается на диаграмме рис. 4 б в виде тренда обратной зависимости величин а. ф. $(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Mg})$ и а. ф. $(\text{Ti} + \text{Nb})$. Но здесь также видны отклонения от идеальной линии $\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Mg} + \text{Ti} + \text{Nb} = 4$ (пунктирная линия на рис.), для отдельных составов нептунита из фойяитов и лопарититов эти отклонения существенные. Такие отклонения могут быть обусловлены еще одной частичной неупорядоченностью: в заполнении позиций щелочных металлов и железа. Часть составов демонстрирует явный недостаток катионов $\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Mg} + \text{Ti} + \text{Nb}$, подобно анализам 2 и 5 табл. 2, допуская вхождение в их позиции щелочных металлов. Избыток $\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Mg} + \text{Ti} + \text{Nb}$ катионов проявляется реже и в меньшей степени (табл. 2, ан. 1, 8).

Наиболее упорядочен нептунит из пегматитов, что может быть связано либо с его высокой железистостью, либо с иными условиями кристаллизации.

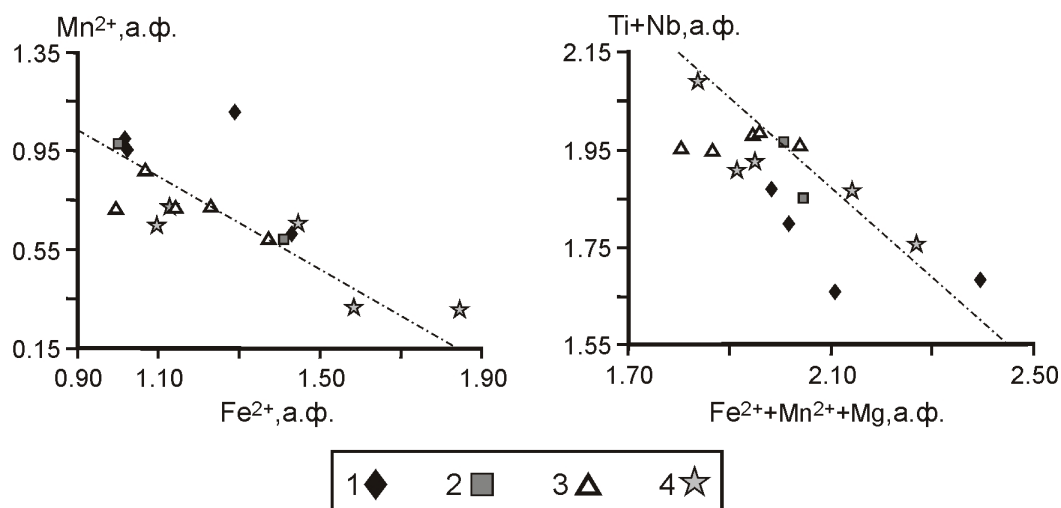


Рис. 4. Соотношение элементов (а. ф. = атом на формулу) в составе нептунита из Ловозерского щелочного массива: 1 – фойяиты, эвдиалитовый комплекс; 2 – уртиты, дифференцированный комплекс; 3 – лопарититы; 4 – пегматиты

Fig. 4. Component ratios (a.f. = atom per formula) for neptunite from the Lovozero massif. Symbols: 1 – foyaite, Eudialyte Complex; 2 – urtite, Layered Complex; 3 – loparite; 4 – pegmatite

Заключение

Для Ловозерского щелочного массива существенно расширена представительность пород, содержащих акцессорный нептунит. Ранее известная находка нептунита в пегматите № 45 г. Лепхенельм (Семенов, 1972; Пеков, 2001) дополнена данными по нептуниту из фойяитов эвдиалитового комплекса, уртитов дифференцированного комплекса, лопарититов и пегматитовой жилы «Сиреневая». Для магматических пород несколько большая встречаемость нептунита отмечена для: 1) фойяитов, образующих линзовидные или пластовые тела среди главных пород эвдиалитового комплекса – эвдиалитовых луавритов; 2) лопарититов. Это может свидетельствовать о специфичности условий образования минерала.

Особенности морфологии, а именно, совместное с альбитом и цеолитами заполнение интерстиций породообразующих минералов, указывают на позднее образование минерала в породах. Из часто ассоциирующихся с нептунитом минералов следует отметить эгирин, лопарит и рабдофан-(Ce).

Идиоморфизм нептунита в пегматитовых телах, отмеченная приуроченность к полостям в гидротермально переработанных зонах пегматита (Пеков, 2001) также указывают на позднюю кристаллизацию нептунита.

Химический состав минерала демонстрирует непрерывный изоморфный ряд до манганонептунита, причем наиболее железистый нептунит установлен в пегматитовых телах. Анализ составов показал высокую вероятность частичной неупорядоченности как в позициях Fe-Ti, так и в Fe-Na, причем наиболее упорядоченный нептунит также характерен для пегматитов.

Исходя из полученных данных, можно отметить перспективность дальнейших структурных (распределение катионов) и химических (содержание лития, валентное состояние железа (и марганца)) исследований для нептунита из Ловозерского массива.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Ю. А. Михайловой, О. Д. Мокрушиной за образцы пород, предоставленные для исследования.

Работа выполнена в рамках темы НИР FMEZ-2024-0008.

Литература

1. Бонштедт Э. М. О марганцевом нептуните из Хибинских и Ловозерских тундр // Известия РАН. 1924. С. 1–12.
2. Борисов С. В., Клевцова Р. Ф., Бакакин В. В., Белов Н. В. Кристаллическая структура нептунита // Кристаллография. 1965. Т. 10, № 6. С. 815–821.
3. Буссен И. В., Сахаров А. С. Строение Ловозерского щелочного массива // ЗВМО. 1958. Т. 87, № 1. С. 101–106.
4. Буссен И. В., Сахаров А. С. Петрология Ловозерского щелочного массива. Л. Изд-во: Наука, 1972. 296 с.
5. Власов К. А., Кузьменко М. В., Еськова Е. М. Ловозерский щелочной массив: породы, пегматиты, минералогия, геохимия и генезис. М. Изд-во: АН СССР, 1959. 623 с.
6. 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. Изд-во: Наука, 1966. 392 с.
7. Задов А. Е., Газеев В. М., Каримова О. В., Перцев Н. Н., Пеков И. В., Галускин Е. В., Галускина И. О., Гурбанов А. Г., Белаковский Д. И., Борисовский С. Е., Карташов П. М., Иванова А. Г., Якубович О. В. Магнезионептунит $\text{KNa}_2\text{Li}(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}$ – новый минерал группы нептунита // ЗРМО. 2011. Т. 140, № 1. С. 57–66.
8. Дусматов В. Д., Кабанова Л. К. О находке нептунита в Таджикистане // Доклады АН ТаджССР. 1967. Т. 10, № 6. С. 40–42.
9. Золотарев А. А., Владыкин Н. В., Кривовичев С. В., Паникоровский Т. Л. Структурная минералогия Хан-Богдинского нептунита (Монголия) // ЗВМО. 2016. Т. 145, № 2. С. 112–127.
10. Пахомовский Я. А., Яковенчук В. Н., Иванюк Г. Ю., Меньшиков Ю. П. Новые данные по минералогии жилы Сиреневая, г. Аллуайв, Ловозерский массив // Труды II Ферсмановской научной сессии Кольского отделения РМО. Апатиты, 18–19 апреля 2005 г. Апатиты. Изд-во: К & М, 2005. С. 72–75.
11. Пеков И. В. Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М. Изд-во: Земля, 2001. 464 с.
12. Сапрыкина Л. Г., Жадрицкий В. Л., Пантелеймонов В. М., Терешков В. Г. Отчет о поисковых работах на апатит в пределах Ловозерского щелочного массива в 1974–76 гг. и о поисках апатитовых руд в породах эвдиалитового комплекса северо-восточной части Ловозерского массива в 1975–77 гг. Т. II: графические приложения / Мурманская ГРЭ, Ловозерская ГРП; рук. Л. Г. Сапрыкина; исполн.: В. Л. Жадрицкий, В. М. Пантелеймонов, В. Г. Терешков. Ревда, 1977.
13. Семёнов Е. И. Минералогия Ловозерского массива. М. Изд-во: Наука, 1972. 307 с.
14. Сорохтина Н. В., Волошин А. В., Пахомовский Я. А., Селиванова Е. А. Первая находка дациншанита-(Се) на Кольском полуострове // Труды I Ферсмановской научной сессии Кольского отделения Российского минералогического общества, посвященной 120-летию со дня рождения А. Е. Ферсмана и А. Н. Лабунцова. г. Апатиты, 2004 г. С. 34–36.
15. Чуканов Н. В., Моисеев М. М., Пеков И. В., Лазебник К. А., Раствораева Р. К., Закайина Н. В., Феррарис Г., Ивальди Г. Набалампрофиллит, $\text{Ba}(\text{Na},\text{Ba})\{\text{Na}_3\text{Ti}[\text{Ti}_2\text{O}_2\text{Si}_4\text{O}_{14}](\text{OH},\text{F})_2\}$, новый титаносиликатный слой группы лампрофиллитов из щелочно-ультраосновных массивов Инагли и Ковдор, Россия // ЗРМО. 2004. Т. 133, № 1. С. 59–72.

16. Шаблинский Г. Н. К вопросу о глубинном строении Хибинского и Ловозерского плутонов // Труды Ленинградского общества естествоиспытателей. 1963. Т. 74, № 1. С. 41–43.
17. Яковенчук В. Н., Иванюк Г. Ю., Пахомовский Я. А., Меньшиков Ю. П. Минералы Хибинского массива. М. Изд-во: Земля, 1999. 318 с.
18. Arzamastsev A. A., Arzamastseva L. V., Zhirova A. M., Glaznev V. N. Model of Formation of the Khibiny-Lovozero ore-bearing volcanic-plutonic complex // *Geology of Ore Deposits*. 2013. V. 55, No. 5. P. 341–356. <https://doi.org/10.1134/s1075701513050024>.
19. Bradley W. M. On the analysis of the mineral neptunite from San Benito County, California // *American Journal of Science*. 1909. 4th Series. V. 28. P. 15–16.
20. Cannilo E., Mazzi F., Rossi G. The crystal structure of neptunite // *Acta Crystallographica*. 1966. V. 21, No. 2. P. 200–208. <https://doi.org/10.1107/s0365110x6600262>.
21. Flink G. Om några mineral från Grönland // *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*. 1893. V. 15, No. 4. P. 195–208. <https://doi.org/10.1080/11035899309442185>.
22. Ford W. E. Neptunite crystals from San Benito, California // *American Journal of Science*. 1909. 4th Series. V. 27. P. 235–240.
23. Gomes C. B., Azzi A. A., Atencio D. A review of mineral assemblages of agpaitic rocks from the Poços de Caldas alkaline massif, southeastern Brazil // *Geology Brazilian Journal of Geology*. 2023. V. 53(2). P. 1–14. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202320220076>.
24. Heinrich E. W., Quon S. H. Neptunite from Seal Lake, Labrador // *Canad. Mineral*. 1963. V. 7. P. 650–654.
25. Horváth L., Gault R. A., Pfenninger-Horváth E., Poirier G. Mont Saint-Hilaire: History, Geology, Mineralogy // *Canad. Mineral. Special Publication No. 14*. 2019. 634 pp.
26. Laird J., Albee A. L. Chemical composition and physical, optical, and structural properties of benitoite, neptunite, and joaquinite // *Amer. Mineral*. 1972. V. 57, No. 1–2. P. 85–102.
27. Lustrino M., Cucciniello C., Melluso L., Tassinari C. C., de Gennaro R., Serracino M. Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in the NW sector of the Gharyan volcanic field, Libya // *Lithos*. 2012. V. 155. P. 218–235. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.09.003>.
28. Kunz M., Armbruster T., Lager G. A., Schulz A. J., Goyette R. J., Lottermoses W., Amthauer G. Fe, Ti ordering and octahedral distortions in acentric neptunite: Temperature dependent X-ray and neutron structure refinements and Mossbauer spectroscopy // *Physics and Chemistry of Minerals*. 1991. V. 18, No. 3. P. 199–213. <https://doi.org/10.1007/bf00234004>.
29. Mikhailova Ju. A., Pakhomovsky Ya. A., Selivanova E. A., Kompanchenko A. A. Polyminerale inclusions in loparite-(Ce) from the Lovozero alkaline massif (Kola Peninsula, Russia): hydrothermal association in miniature // *Minerals*. 2023. V. 13, No. 6. P. 715 (25). <https://doi.org/10.3390/min13060715>.
30. Nockolds S. R. On the occurrence of neptunite and eudialyte in quartz-bearing syenites from Barnavave Carlingford, Ireland // *Miner. Mag.* 1950. V. 29. P. 27–33.
31. Pekov I. V., Podlesnyi A. S. Kukisvumchorr Deposit: Mineralogy of Alkaline Pegmatites and Hydrothermalites. *Mineralogical Almanac*. 2004. V. 7. Moscow: Association Ecost and Denver: Ocean Pictures Ltd. 2004. 168 p.
32. Slansky E., Glen R. A. Neptunite from the Woodsreef Serpentinite, New South Wales: A new occurrence // *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*. 1982. V. 30, No. 4. P. 237–247. <https://doi.org/10.1007/bf01087170>.
33. Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85, No. 3. P. 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>.