

Нефелин – типоморфный минерал пород Хибинского щелочного массива: обзор литературных данных и перспективы изучения

Гойчук О.Ф. ¹, Коноплёва Н.Г. ¹, Паниковровский Т.Л. ²

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, o.goychuk@ksc.ru, n.konopleva@ksc.ru

² Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, t.panikorovskii@ksc.ru

Аннотация. Нефелин является одним из главных породообразующих минералов Хибинского щелочного массива и вторым по значимости промышленно-ценным минералом. В статье приведен обзор литературных данных по нефелину и обозначена перспектива его изучения.

Ключевые слова: нефелин, Хибинский массив, типоморфный минерал, состав нефелина, температура кристаллизации, упорядоченность структуры.

Nepheline as a typomorphic mineral of rocks of the Khibiny alkaline massif: review of literary data and prospects for study

Goychuk O.F. ¹, Konopleva N.G. ¹, Panikorovskii T.L. ²

¹ Geological Institute KSC RAS, Apatity, o.goychuk@ksc.ru, n.konopleva@ksc.ru

² Laboratory of Geo-inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic region FRC KSC RAS, Apatity, t.panikorovskii@ksc.ru

Abstract. Nepheline is one of the main rock-forming minerals of the Khibiny alkaline massif and the second most commercially valued mineral. The article reviews literary data on nepheline and outlines prospects for its study.

Keywords: nepheline, Khibiny alkaline massif, typomorphic mineral, nepheline composition, crystallization temperature, structure ordering.

Введение

Нефелин является одним из главных породообразующих минералов практически всех пород Хибинского массива и вторым по значимости промышленно-ценным минералом апатито-нефелиновых руд, концентрирующим в себе Al_2O_3 , а также попутные полезные компоненты – Ga_2O_3 , Rb_2O и Cs_2O . Именно поэтому составу и свойствам нефелина посвящено множество исследований. Систематическое изучение этого минерала началось ещё в 1928 году (Куплетский, 1928) и продолжается до наших дней. За это время выявлены основные типоморфные черты хибинского нефелина, касающиеся его морфологии, состава и свойств. Возможности современных аналитических методов могут позволить провести более тонкие структурно-вещественные исследования и получить новую информацию об этом очень важном минерале.

Морфология нефелина

Морфология выделений нефелина в породах массива разнообразна. В одних и тех же породах наблюдается несколько морфологических разновидностей нефелина. И в то же время одна и та же морфологическая разновидность часто прослеживается в различных породах.

В фойяитах нефелин формирует крупные (до 3 см в поперечнике) короткопризматические кристаллы, сечения которых имеют квадратные, прямоугольные или гексагональные очертания (рис. 1 а). Часто кристаллы нефелина имеют полизональное строение, обусловленное периодическим распределением в них мельчайших включений эгирина. Эта зональность, скорее всего, связана с периодическим образованием кристалликов эгирина на фронте роста зерна нефелина по мере достижения расплавом пересыщения в отношении железа.

В рихторритах нефелин встречается в виде трёх морфологических разновидностей: 1) идиоморфных зёрен размером до 8 мм совместно с эгирином и калийарфведсонитом пойкилитово включенных в крупные пойкилобласты ортоклаза (рис. 1 d); 2) мелких (до 5мм в поперечнике) идиоморфных

или неправильной формы зёрен в промежутках между кристаллами полевого шпата и 3) микропегматитовых сростаний с полевым шпатом (симплектитов). Формирование пойкилобластов ортоклаза нередко сопровождается кальсилитизацией нефелина.

В мельтейгит-уртитах более или менее идиоморфные кристаллы нефелина самого разного размера (до 2 см в поперечнике) формируют каркасный агрегат, интерстиции в котором заполнены клинопироксенами и калиевым полевым шпатом (рис. 1 б, с). В гнейсовидных разновидностях ийолитов зёрна нефелина имеют длиннопризматический облик и вытянуты в направлении гнейсовидности. В урритах присутствуют также зёрна нефелина, пойкилитово включённые в крупные метакристаллы эгирин-авгита, калийрихтерита, ортоклаза, титанита и титаномагнетита.

В апатито-нефелиновых породах нефелин входит в состав ийолит-уртитовых фрагментов или, вследствие перекристаллизации, образует крупные идиоморфные кристаллы (до 8 см в сечении) с реликтами ийолит-уртитов в ядрах (так называемые блоковые руды и уртиты). В достаточно мощных апатитовых прожилках руд встречаются хорошо образованные призматические пойкилокристаллы (до 2 см в длину) новообразованного нефелина, часто ассоциирующего с метакристаллами титанита, эвдиалита, энigmatита и астрофиллита. В существенно апатитовых и апатито-титанитовых породах зёрна нефелина имеют округлые формы и неправильные извилистые очертания, зачастую с вростками апатита по краям.

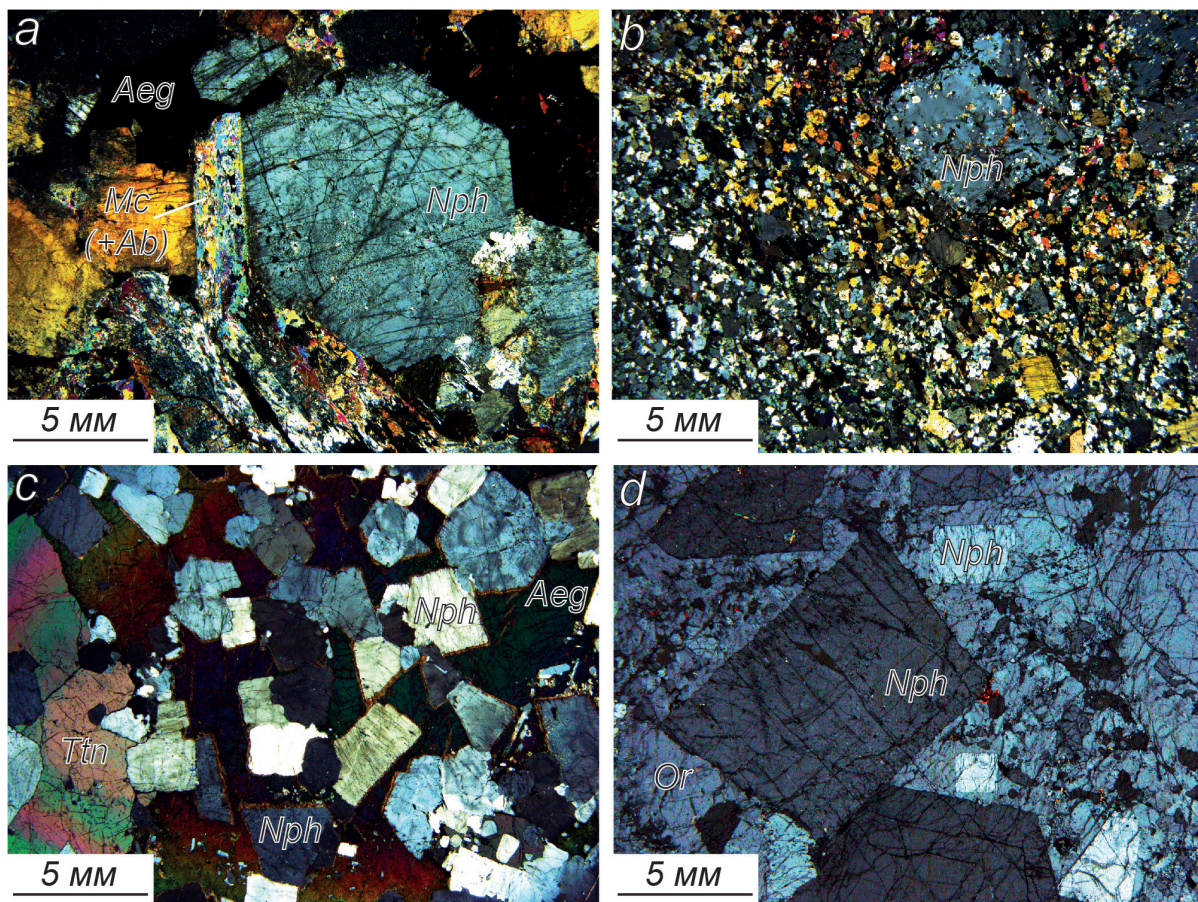


Рис. 1. Фото комбинированных шлифов в поляризованном свете. Нефелин в породах Хибинского щелочного массива: а – фойяит (образец КН-119); б – ийолит: основная масса сложена нефелином, калиевым полевым шпатом, эгирин-авгитом, калийрихтеритом, титанитом (образец КН-50); с – уртит (образец КН-136); d – рисчоррит (образец КН-139Б). Ab – альбит, Aeg – эгирин, Mc – микроклин, Nph – нефелин, Or – ортоклаз, Ttn – титанит.

Fig. 1. Photo of combined thin sections in polarized light. Nepheline in rocks of the Khibiny alkaline massif: a – foyaite (sample KN-119); b – iolite: the main mass is composed of nepheline, potassium feldspar, aegirine-augite, potassium-richterite, titanite (sample KN-50); c – urtite (sample KN-136); d – rischorrite (sample KN-139B). Ab – albite, Aeg – aegirine, Mc – microcline, Nph – nepheline, Or – orthoclase, Ttn – titanite.

В ороговикованных и фенитизированных вулканогенно-осадочных породах ловозерской свиты нефелин развивается в виде отдельных полос и прожилков, согласных со слоистостью породы, а также формирует крупные (до 8 см в поперечнике) порфиробласты с реликтовыми включениями основной породы.

Отличия в характере выделений нефелина в различных породных комплексах массива позволяют говорить о кристаллизации его в виде нескольких генераций и свидетельствуют о длительности и изменении условий его роста, а также о явлениях последующей перекристаллизации и различном генезисе (Дудкин и др., 1964; Козырева, 1966; Костылева-Лабунцова и др., 1978; Яковенчук и др., 2010).

Особенности состава нефелина

Нефелин относится к группе минералов, химический состав которых может меняться в зависимости от условий образования. Нефелины из пород и пегматитов Хибинского массива по своему химическому составу отчетливо делятся на две группы: нефелины нефелиновых сиенитов и нефелины мельтейгит-уртитов, апатито-нефелиновых пород и рисчорритов. В породах первой группы среднее содержание калиофиллитового компонента в нефелинах достигает 18.6 %, избыток кремнезёма – 7.4 %. В породах второй группы нефелин обогащён калием – среднее содержание калиофиллитового компонента – 24.3 %, а избыток кремнезёма – 4.0 % (Козырева, 1965; Костылева-Лабунцова и др., 1978).

В целом же, в составе нефелина при переходе от ороговикованных и фенитизированных пород ловозерской свиты и фойяитов к фойдолитам, апатито-нефелиновым породам и пегматито-гидротермальным жилам нефелин последовательно обогащается калием и алюминием за счет кремния вследствие изоморфизма по схеме: $\square_B + \text{Si}^{4+}_T \leftrightarrow \text{K}^+_B + (\text{Al}, \text{Fe})^{3+}_T$. Аналогичный тренд изменения состава наблюдается в зональных кристаллах нефелина, в которых краевые зоны отличаются от ядер более высоким содержанием алюминия и калия.

В самих же фойяитах (включая т.н. «хибиниты») наблюдается закономерное изменение состава минерала от края и центра массива к Главному фойдолитовому кольцу, которое может быть выражено формулой: $\square_B + (\text{Si}^{4+} + \text{Fe}^{3+})_T \leftrightarrow \text{K}^+_B + 2\text{Al}^{3+}_T$. Избыточное относительно стехиометрии содержание кремния и повышенное содержание железа отмечены в нефелине из фойяитов краевой и центральной частей массива. Вблизи Главного кольца замена кремния алюминием в составе нефелина из фойяитов приводит к увеличению в нём натрия: $\square_A + \text{K}^+_B + \text{Si}^{4+}_T \leftrightarrow \text{Na}^+_A + \square_B + \text{Al}^{3+}_T$, тогда как в нефелине из мельтейгит-уртитов преимущественное замещение кремния железом компенсируется калием: $\text{Na}^+_A + \square_B + \text{Si}^{4+}_T \leftrightarrow \square_A + \text{K}^+_B + \text{Fe}^{3+}_T$ (Яковенчук и др., 2010). В составе нефелина из фойдолитов продуктивной толщи Коашвинского месторождения наблюдается увеличение содержания алюминия в направлении от контактов с нефелиновыми сиенитами к осевой зоне фойдолитов (Конноплева, 2009).

Отмеченные различия в составе нефелинов позволяют на основании имеющихся экспериментальных данных (Hamilthon, 1961) судить о температуре их кристаллизации. Известно, что высокотемпературный нефелин обычно содержит повышенное относительно стехиометрии количество кремния и пониженное количество калия. В работе (Яковенчук и др., 2010) приведено уравнение, аппроксимирующее график зависимости температуры кристаллизации пород массива (по оценке различных исследователей) от среднего содержания кремния в слагающем их нефелине. Оцененная по этому уравнению температура кристаллизации нефелина в фенитизированных вулканогенно-осадочных породах соответствует 913 °С, в фойяитах – 884 °С, в фойдолитах – 512 °С, в рисчорритах – 455 °С, в апатито-нефелиновых породах – 426 °С, а в пегматито-гидротермальных жилах – 197 °С.

Нами обнаружена ещё одна интересная закономерность в составе нефелина: наибольшая сумма компонентов наблюдается в анализах нефелина из пород западного края и центра массива, а наименьшая – в покрывающих фойдолитовую толщу фойяитах западного сектора Главной кольцевой структуры (рис. 2). Анализы нефелина выполнены Я.А. Пахомовским (Геологический институт КНЦ РАН) на микроанализаторе MS-46 Сатеса при стандартных условиях (Яковенчук и др., 2010). Де-

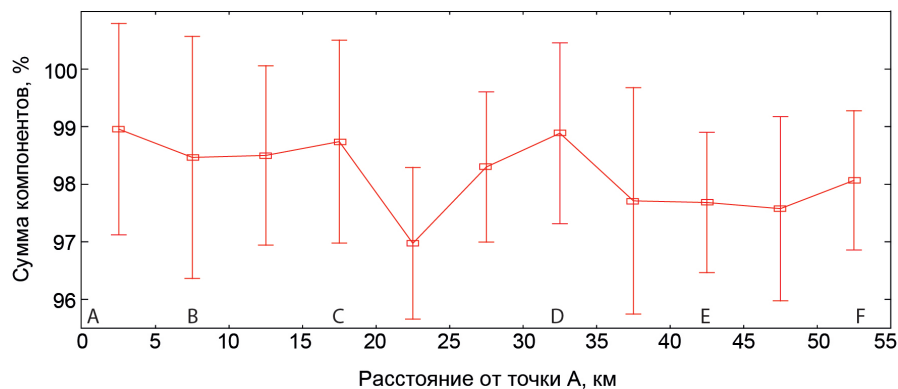


Рис. 2. Изменение суммы компонентов в составе нефелина по профилю *A–B–C–D–E–F* (точка *A* – западный край массива, *B* – Малая дуга, *C* – Главное фойдолитовое кольцо (г. Поачвумчорр), *D* – центр массива, *E* – Главное фойдолитовое кольцо (месторождение Коашва), *F* – южный край массива).

Fig. 2. Changes in the sum of components in the nepheline composition along the profile *A–B–C–D–E–F* (point *A* – western side of the massif, *B* – Minor arc, *C* – Main foidolite ring (Poachvumchorr), *D* – center of the massif, *E* – Main foidolite ring (Koashva deposit), *F* – southern side of the massif).

фицит суммы, вероятно, свидетельствует о том, что в составе нефелина имеются компоненты, которые на микроанализаторе не определяются. Таким компонентом может быть вода. Наличие воды в составе нефелина отмечали многие исследователи (Самсонова, 1973; Костылева-Лабунцова и др., 1978 и др.). Но в этих работах приводятся анализы монофракций нефелина, выполненные методом «мокрой химии», что не исключает связи воды с натролитом, часто развивающимся по нефелину, или с газово-жидкими включениями в нефелине. Более поздние исследования точечными методами ИК-спектроскопии (микро-FTIR) природного и выращенного в контролируемых экспериментальных условиях нефелина также подтвердили наличие воды (Симакин и др., 2008). Форма нахождения воды в формально безводном нефелине остается дискуссионной и требует дальнейшего изучения.

Структура нефелина

Кристаллическая структура нефелина (рис. 3) родственна структурному типу тридимита, в которой часть атомов Si замещена Al. Каркас минерала образуют искаженные 6-членные кольца из тетраэдров SiO_4 , AlO_4 , связанных друг с другом своими вершинами, а в пустотах каркаса находятся ионы K и Na. Закономерное изменение химического состава нефелина в профилях Хибинского массива (соотношение Al/Si, Si/K), наличие примесей Fe^{3+} , а также P-T условия кристаллизации предполагают воздействие указанных факторов на кристаллическую структуру нефелина.

Структурные исследования показали, что нефелины различного генезиса отличаются друг от друга по степени упорядочения атомов Si и Al в тетраэдрических позициях. По литературным данным существуют две точки зрения на проблему упорядочения Si и Al в тетраэдрических позициях нефелина: 1) увеличение степени Si – Al разупорядочения в ряду метаморфические – интрузив-

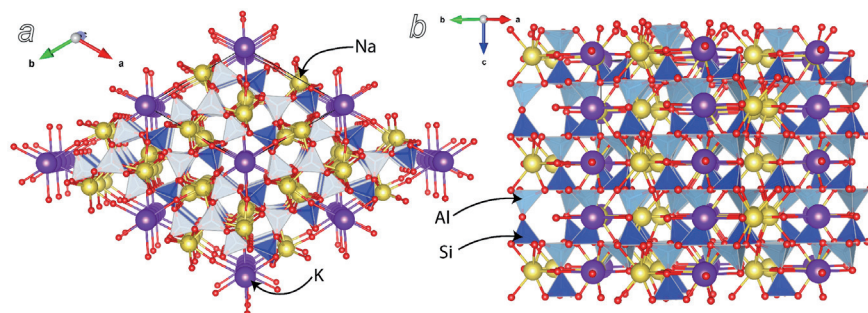


Рис. 3. Проекция кристаллической структуры нефелина в перспективе вдоль [001] (a) и вдоль направления [110] (b).

Fig. 3. Perspective projection of nepheline crystal structure along [001] (a) and [110] (b) directions.

ные – вулканические породы связано с температурным режимом кристаллизации (Hanh & Buerger 1955; Simmons & Peacor 1972; Sahama, 1962, 1966); 2) структура нефелина максимально упорядочена независимо от его происхождения (Tait et al., 2003). Надеемся, что проведение дальнейших исследований по выявлению пространственных закономерностей изменения состава и структурного состояния нефелина в породах Хибинского массива позволит использовать типоморфные особенности нефелина как индикаторы условий образования пород, что имеет важное значение для решения вопросов петрогенезиса нефелин-сиенитовых и фойдолитовых комплексов.

Промышленно-ценные компоненты в составе нефелина

Нефелин – второй по значимости и востребованности промышленно-ценный минерал хибинских апатито-нефелиновых руд. Помимо алюминия он концентрирует в себе Ga_2O_3 , Rb_2O и Cs_2O . Содержание алюминия в нефелине определяется изоморфизмом по известной схеме: $\square_B + Si^4_T \leftrightarrow K^+_B + (Al, Fe)^{3+}_T$ сопровождающей уменьшение температуры кристаллизации минерала. Это означает, что в наиболее поздних фойдолитах и апатито-нефелиновых рудах нефелин содержит повышенное относительно вмещающих нефелиновых сиенитов количество алюминия и калия (Яковенчук и др., 2010). Содержание галлия, изоморфно замещающего алюминий в составе нефелина, растёт по мере уменьшения содержания самого нефелина (при увеличении содержания полевого шпата) в породах продуктивного комплекса (Коноплева и др., 2019). Рубидий и цезий изоморфно замещают калий в составе нефелина. С.Н. Ивановым (1987) была выявлена высоко значимая положительная корреляция между содержанием рубидия в нефелине (и полевом шпате) и количеством полевого шпата в породе.

Выявление закономерностей изменения содержаний основного (Al_2O_3) и попутных полезных компонентов (Ga_2O_3 , Rb_2O , Cs_2O и K_2O) в составе нефелина может быть использовано для определения наиболее перспективного нефелинового сырья.

Зависимость содержания попутных компонентов в нефелине (и полевом шпате) от степени полевошпатовости пород явно связана с процессами кальсилито-ортоклазового метасоматоза (Костылева-Лабунцова и др., 1978; Иванов, 1987), приведшего к появлению новообразований – обогащенных калием нефелина и ортоклаза. Этот факт позволяет использовать состав нефелина в качестве индикатора метасоматических преобразований пород. Потенциальный интерес в качестве калиевого сырья представляют собой рихсчорриты из-за высокого содержания K_2O в нефелине и замещения последнего кальсилитом.

Перспективы дальнейшего изучения нефелина

Исходя из вышеизложенного, наши дальнейшие работы предполагают изучение нефелина с использованием современных методов минералогических и кристаллографических исследований:

- дополнительное изучение пространственных закономерностей изменения состава и структуры нефелина в пределах массива по профилям от центра массива к его северо-западному и северо-восточному контактам;
- детальное изучение минеральных включений в нефелине;
- изучение пространственных закономерностей изменения содержаний попутных полезных компонентов в составе нефелина;
- применение топокристаллохимического метода (Ivanyuk et al., 2018, Важнейшие..., 2018), основанного на анализе пространственно-временных закономерностей изменения кристаллической структуры нефелина для выявления скрытой зональности.

Работа выполнена по теме НИР АААА-А19-119 100290149-1.

Литература

1. Важнейшие научные результаты 2018 г. КНЦ РАН. 2018. 20 с.
2. Дудкин О.Б., Козырева Л.В., Померанцева Н.Г. Минералогия апатитовых месторождений Хибинских тундр. М.-Л. Изд-во: Наука. 1964. 236 с.
3. Иванов С.Н. Оптимизация методики разведки и подсчета запасов комплексных апатито-нефелиновых месторождений. Канд. дисс. МГРИ. 1987. 259 с.

4. Козырева Л.В. Нефелин и сопутствующие ему минералы Хибинского щелочного массива. Автореф. канд. дисс. ЛГУ. 1965. 15 с.
5. Козырева Л.В. Нефелин-полевошпатовые парагенезисы в породах Хибинского щелочного массива // *Материалы по минералогии Кольского полуострова*. № 5. Л. Изд-во: Наука. 1967. С. 79–82.
6. Козырева Л.В. О морфологии нефелина ряда хибинских пород // *Щелочные породы Кольского полуострова*. М.-Л. Изд-во: Наука. 1966. С. 79–82.
7. Козырева Л.В. О соотношении калия и рубидия в породообразующих минералах Хибинского щелочного массива / *Щелочные породы Кольского полуострова*. М.-Л. Изд-во: Наука. 1966. С. 83–92.
8. Коноплева Н.Г. Геология апатито-нефелинового месторождения Коашва (Хибинский массив). Канд. дисс. МГУ. 2009. 275 с.
9. Коноплева Н.Г., Калашников А.О., Иванюк Г.Ю. Возможность расчёта содержания попутных компонентов в минералах хибинских апатито-нефелиновых руд по данным рядового опробования // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2019. № 16. С. 283–287. <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.057>
10. Костылева-Лабунцова Е.Е., Боруцкий Б.Е., Соколова М.Н., Шлюкова З.В., Дорфман М.Д., Дудкин О.Б., Козырева Л.В., Икорский С.В. Минералогия Хибинского массива. Т. 2. М. Изд-во: Наука. 1978. 227 с.
11. Самсонова Н.С. Минералы группы нефелина. М. Изд-во: Наука. 1973. 151 с.
12. Симакин А.Г., Салова Т.П., Завельский В.О. Вхождение воды в структуру нефелина по данным ЯМР и ИК-спектроскопии // *Геохимия*. 2008. №. 6. С. 674–678.
13. Куплетский Б.М. Петрографический очерк Хибинских тундр // *Труды Института по изучению Севера*. Л. 1928. Вып. 39. С. 76–203.
14. Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Коноплева Н.Г., Михайлова Ю.А., Пахомовский Я.А. Нефелин Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров) // *ЗРМО*. 2010. № 2. С. 80–91.
15. Hamilton D.L. Nephelines as crystallization temperature indicators. *J. Geol.* V. 69. 1961. P. 321–329.
16. Hanh T., Buerger M.J. The detailed structure of nepheline, $\text{KNa}_3\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$. *Z. Kristallogr.* V. 106. 1955. P. 308–338.
17. Ivanyuk G.Yu., Pakhomovsky Ya.A., Panikorovskii T.L., Mikhailova J.A., Kalashnikov A.O., Bazai A.V., Yakovenchuk V.N., Konopleva N.G., Goryainov P.V. Three-D Mineralogical Mapping of the Kovdor Phoscorite-Carbonatite Complex, NW Russia: II. Sulfides // *Minerals*. 2018. V. 8. P. 292. DOI: 10.3390/min8070292.
18. Sahama T.G. Order-disorder in natural nepheline solid solutions. *J. Petrol.* V. 3. 1962. P. 65–81.
19. Simmons W.B., Peacor D.R. Refinement of the crystal structure of a volcanic nepheline. *Am. Mineral.* V. 57. 1972. P. 1711–1719.
20. Tait K.T., Sokolova E., Hawthorne F.C., Khomyakov A.P. The crystal chemistry of nepheline. *Can. Mineral.* V. 41. 2003. P. 61–70.