

М. Д. ДОРФМАН, С. В. ИКОРСКИЙ, М. И. САМОЙЛОВИЧ, В. С. ЛЕБЕДЕВ

О ПРИРОДЕ ВКЛЮЧЕНИЙ ЭГИРИНА В НЕФЕЛИНЕ ХИБИНСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА

Одной из специфических особенностей нефелиновых сиенитов Хибинского массива (Кольский полуостров) является широкое развитие в нефелине включений эгирина.

Микроскопические включения эгирина обычно так густо насыщают кристаллы нефелина, что придают ему характерную зеленоватую окраску и слабую магнитность. Диагностика включений эгирина под микроскопом производится по зеленой окраске, характерному плеохроизму, большому показателю преломления, высокому двупреломлению, отрицательному удлинению и прямому погасанию (угол $cNp \approx 0^\circ$). Отнесение включений пироксена к эгирину подтверждено рентгенометрически путем снятия порошковой дифракционной картины с остатка от растворения темно-зеленых кристаллов нефелина в слабой соляной кислоте (Дудкин и др., 1964).

В нефелине всех комплексов пород, слагающих массив, включения эгирина обычно распределены более или менее равномерно. Реже наблюдаются случаи, когда они располагаются в зонах роста кристалла-хозяина параллельно граням гексагональной призмы и базального пинакоида; по данным Т. Н. Ивановой (1963), включения, концентрирующиеся в зонах роста нефелина горных пород ийолит-уртитового комплекса, следует отнести к эгирин-авгиту. Иногда включения эгирина сосредоточиваются в центральных частях зерен нефелина, образуя там участки, контуры которых в шлифах имеют правильные шести- и четырехугольные очертания. При любом способе размещения включений эгирина в их ориентировке внутри кристалла хорошо заметна тенденция располагаться удлинениями параллельно оси L_6 нефелина.

По форме среди включений эгирина различают тонкие, иногда ветвящиеся иголки, слегка вытянутые зернышки и призматические кристаллики. В одном кристалле нефелина могут встречаться включения различной формы, но обычно наблюдается преобладание какой-нибудь одной разновидности. Размеры включений эгирина изменяются от тысячных до десятых долей миллиметра. Совместно с включениями эгирина в кристаллах нефелина хибинских пород часто присутствуют включения калиевого полевого шпата, виллиомита, жидкости и газа (Икорский, 1967).

Хотя включения эгирина в нефелине Хибин известны с самого начала исследования этого щелочного массива, какого-либо специального изучения их происхождения не проводилось. При петрографических и минералогических описаниях горных пород исследователи обычно ограничивались краткими замечаниями о морфологии и характере размещения включений эгирина, и лишь некоторые авторы высказывали предположения, что включения эгирина могли возникнуть в результате совместной кристаллизации

с нефелином (Галахов, 1959). Иной точки зрения придерживается М. Д. Дорфман (1962), полагая, что эгирина выделился в результате распада твердого раствора эгирина в нефелине.

Известно, что для решения различных генетических вопросов включения посторонних кристаллов используются в меньшей степени, чем включения жидкости, газа или расплава (Ермаков, 1950). Однако в ряде случаев их изучение также может дать определенную информацию об условиях кристаллизации или последующих изменений минерала-хозяина (Ляхов, Пизнюр, 1964).

Как уже отмечалось, включения эгирина в порообразующем нефелине Хибин развиты чрезвычайно широко и их образование является результатом процесса, по-видимому, общего для всех интрузивных комплексов массива. В этой связи можно полагать, что изучение природы включений эгирина в нефелине позволит установить некоторые особенности этого процесса, столь широко проявившегося в породах массива.

В 1964—1966 гг. при сборе материала для изучения включений газов и битумов в минералах Хибинского массива одним из авторов данной статьи (Икорский, 1967) были обнаружены крупные кристаллы нефелина с интересным зональным распределением включений эгирина и полевого шпата. В результате исследования этих кристаллов были получены данные, позволившие сделать определенные выводы о генезисе включений эгирина.

Описываемые кристаллы нефелина были встречены в пегматитовых жилах 3 и 4, залегающих соответственно в неравнозернистых эгириновых нефелиновых сиенитах и фойяитах на западных склонах горы Партомчорр в районе Умбозерского перевала (Икорский, 1967). Подобные образования обнаружены также Л. В. Козыревой в пегматитовых жилах крупнозернистых массивных хибинитов среднего течения р. Гольцовки в северо-западной части массива.

Минеральный состав пегматитов близок к составу вмещающих пород — неравнозернистых нефелиновых сиенитов, фойяитов и хибинитов. Кристаллы нефелина сосредоточены главным образом со стороны лежащего бока пегматитовых жил, где они образуют почти мономинеральный зальбанд. Размеры кристаллов достигают 7—10 см. При соприкосновении друг с другом форма кристаллов бывает несколько искажена. Наиболее правильно образованные формы, имеющие вид коротких гексагональных призм, наблюдаются в тех случаях, когда кристаллы нефелина заключены в агрегат игольчатого эгирина или располагаются между таблитчатыми кристаллами полевого шпата. С поверхности отдельные кристаллы нефелина замещаются натролитом.

На сколах и срезах кристаллов видно, что их центральные части сложены однородным бесцветным или слегка желтоватым прозрачным нефелином, а наружные части непрозрачны и имеют характерную для нефелина Хибинского массива зеленовато-серую окраску. Кайма зеленовато-серого нефелина в разных частях одного и того же кристалла может иметь различную ширину. Граница ее с чистым нефелином расплывчата и, как правило, имеет извилистые очертания. Довольно часто от периферических частей кристаллов в прозрачные участки нефелина проникают узкие извилистые «языки», сложенные таким же, как и наружные части, зеленовато-серым нефелином (рис. 1).

Размеры участков прозрачного и зеленовато-серого замутненного нефелина изменяются в широких пределах даже в рядом расположенных кристаллах. Иногда кристаллы целиком сложены непрозрачным нефелином, среди которого беспорядочно в виде реликтов разбросаны небольшие с расплывчатыми контурами участки прозрачного и полупрозрачного нефелина. В то же время идиоморфные кристаллы нефелина, заключенные в чехле игольчатого эгирина, как правило, бывают целиком сложены прозрачным чистым нефелином.

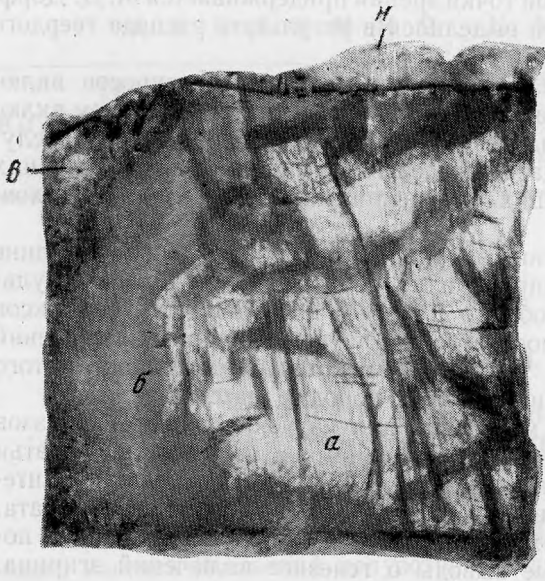


Рис. 1. Полированная пластинка, вырезанная из зонального кристалла нефелина (жила пегматита 3). Увел. 1,4

Зоны прозрачного (а), зеленовато-серого (б) и светло-серого (в) нефелина. С поверхности нефелин замещен натролитом (Н)

Окраска непрозрачных наружных частей кристаллов обычно неодинакова. Вблизи непрозрачных участков кристалла она зеленовато-серая, в самых наружных частях кристаллов она часто становится более светлой, и зеленоватый тон в ней почти исчезает.

Таким образом, в общем случае в кристаллах от центра к периферии по окраске можно выделить три переходящие друг в друга зоны: бесцветно-прозрачного, зеленовато-серого и светло-серого нефелина, которые для удобства обозначим соответственно а, б и в.

Кроме окраски эти зоны внешне отличаются и по степени трещиноватости. Для зон а и б характерны сравнительно немногочисленные протяженные слегка изогнутые трещины, обычно ориентированные более или менее параллельно спайности $\{10\bar{1}0\}$. В зоне в трещиноватость гораздо более интенсивная и имеет вид густой сетки.

Под микроскопом видно, что зеленовато-серая и светло-серая окраска зон б и в обусловлена включениями зерен полевого шпата и эгирина, которые обильно насыщают эти зоны, часто соприкасаясь друг с другом.

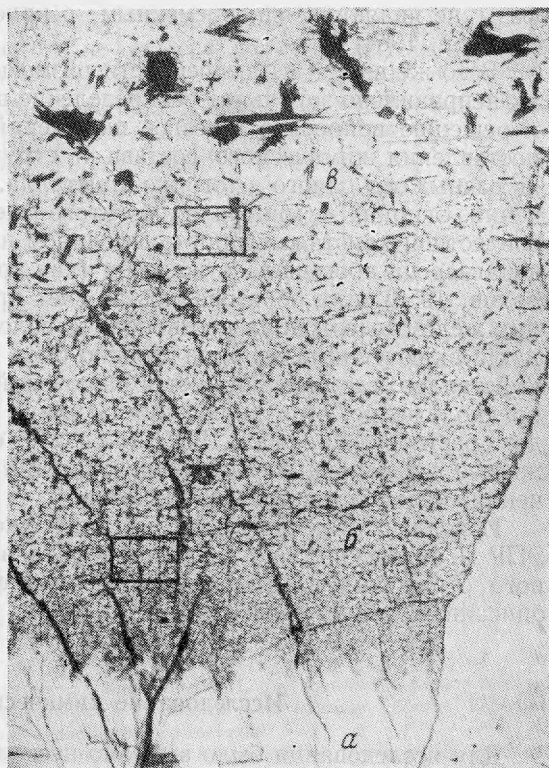
Включения эгирина образуют призматические и игольчатые кристаллики, размеры которых по удлинению колеблются от нескольких микрон до 1—2 мм. Для включений полевого шпата характерны неправильные или грубо прямоугольные зерна размером от тысячных до десятых долей миллиметра. Полевой шпат во включениях представлен в основном калиевым полевым шпатом, реже альбитом. Показатели преломления включений полевого шпата, выделенных из кристалла нефелина пегматитовой жилы 3, следующие: для калиевого полевого шпата $n_g = 1,525—1,526$, $n_m \approx 1,523$, $n_p = 1,518$; для альбита $n_g = 1,539$, $n_m = 1,535—1,536$, $n_p = 1,531—1,532$. Довольно часто крупные включения калиевого полевого шпата имеют четко выраженное пятнистое угасание. Иногда вокруг включений полевого шпата четко наблюдается узкая кайма оптически изотропного низкопреломляющего минерала (анальцима или содалита).

Изучение шлифов, срезы которых захватывают сразу все три зоны, показало, что размер включений эгирина и их количество зависят от места нахождения в кристалле нефелина. Так, для зоны б характерна наиболее высокая плотность включений, однако размеры их не превышают сотых долей миллиметра. Включения располагаются сравнительно равномерно,

причем кристаллики эгирина наименьших размеров концентрируются вблизи границы с чистым нефелином зоны *a*. По мере удаления от этой границы длина кристалликов эгирина возрастает и достигает наибольших размеров (до 1—2 мм) в зоне *v*. Одновременно с этим в зоне *v* наблюдается резкое уменьшение общего количества включений по сравнению с зоной *б*. Описываемая закономерность хорошо видна на рис. 2. Кроме того, для включений эгирина зоны *v* характерна тенденция к образованию различных по форме сростков, что почти не наблюдается среди включений в зоне *б*. Общим в расположении включений эгирина в обеих зонах является стремление ориентироваться своими удлинениями по спайности $\{10\bar{1}0\}$, реже $\{0001\}$.

Для включений полевого шпата также отмечается аналогичная связь между размером включений и их общим количеством в зонах, однако выражена она менее отчетливо.

Рассмотренные особенности размещения включений эгирина в кристаллах нефелина (неправильная зональность, приуроченность отдель-



I



II



III

Рис. 2. Срез краевой части кристалла нефелина через зоны *a*, *б*, *v*. Толстый шлиф, обр. 34
 I — общий вид. Увел. 7; соотношение между размерами и количеством включений эгирина в зонах *б*(III) и *v*(II) на участках, выделенных прямоугольниками на снимке I. Увел. 100

ных участков с включениями к узким пересекающимся зонам — «языкам», направленным вдоль залеченных трещин, отсутствие какой-либо связи с зонами роста кристалла-хозяина, однообразная ориентировка включений, находящихся в разных частях кристалла) приводят к выводу, что процесс образования включений эгирина как самостоятельной кристаллической фазы не является одновременным с кристаллизацией нефелина (Ляхов, Пизнюр, 1964).

В то же время эти особенности размещения включений, и прежде всего их неправильно-зональное распределение в кристаллах, позволяют подойти к решению вопроса о генезисе включений эгирина путем изучения и сопоставления химического состава и структурных особенностей нефелина из разных зон одного и того же кристалла. В действительности, если включения эгирина — минерала, богатого железом, возникли в результате совместной кристаллизации с нефелином на этапах, когда минералообразующая среда обогащалась железом (как это, например, полагает А. В. Галахов, 1959), или образовались за счет проникновения в кристаллы поздних железосодержащих растворов, то валовое содержание железа на участках с включениями эгирина должно быть более высоким, чем в тех частях кристаллов, где нефелин чист и включений не содержит. Если справедливо предположение, что включения эгирина — это результат распада твердого раствора (Дорфман, 1962), то следует ожидать, что валовое содержание железа в прозрачных частях кристаллов и на участках, содержащих включения, будет оставаться одинаковым.

Исходя из этих допущений, были изучены химический состав, спектры ЭПР и оптического поглощения нефелина, а также ИК-спектры зеркального отражения в прозрачных и замутненных включениями зонах ряда описанных выше кристаллов.

Исследование химического состава

Для исследования было выбрано несколько обломков крупных кристаллов из разных пегматитовых жил. При выделении проб на химические анализы кристаллы нефелина сначала раскалывались (примерно по границам зон) на несколько частей, каждая из которых затем дробилась на обломки размером 1—3 мм. Ручной отборкой из раздробленного материала каждой зоны отбирались навески для анализа. Таким образом, выделенные пробы представляли нефелин не в одной определенной точке кристалла, а являлись усредненными для конкретной зоны кристалла в целом. Детальность исследования химического состава в разных кристаллах была различной. Наиболее полно изучены кристаллы 4 и 14.

Химические анализы проб производились двумя методами: а) определение состава нефелина растворением его в слабой соляной кислоте на холоду с отделением нерастворимого остатка — включений эгирина и полевого шпата; б) определение валового состава нефелина с включениями сплавлением пробы с содой.

В результате исследований установлены следующие особенности химического состава нефелина в различных зонах кристаллов.

При сопоставлении химического состава чистого нефелина зоны *a* (силикосиловая вытяжка) с валовым анализом зоны *b* тех же кристаллов (табл. 1, анализы I и III) видно, что они мало отличаются друг от друга. Для зоны *b* отмечается лишь очень незначительное уменьшение содержания SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O и несколько более высокое содержание K_2O и CaO . Обращает на себя внимание, что в пределах одного кристалла как для прозрачных участков (зона *a*), так и для участков, где развиты включения эгирина (зона *b*), содержание железа практически остается постоянным, При этом в зоне *b* по сравнению с зоной *a* содержание FeO уменьшается,

Химический состав кристаллов нефелина (в вес. %)

Компоненты	Кристалл 2			Кристалл 3			Кристалл 4			Кристалл 14		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
SiO ₂	44,08	46,66	—	44,12	43,03	—	44,96	43,06	44,11	44,95	43,25	44,14
TiO ₂	—	—	—	—	—	—	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	32,18	33,61	—	32,33	33,09	—	31,87	32,58	31,43	30,90	32,56	30,48
Fe ₂ O ₃	0,50	} 0,24	0,72	0,57	} 0,27	0,68	0,67	} 0,32	0,72	1,49	} 0,16	1,95
FeO	0,13		0,08	0,11		0,11	0,15		0,15	0,10		0,33
MnO	—	—	—	—	—	—	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	—	—	—	—	—	—	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	—	—	—	—	—	—	0,11	0,10	0,34	0,15	0,22	0,36
Na ₂ O	16,80	16,95	—	16,67	16,50	—	16,64	16,37	15,82	16,80	16,68	15,46
K ₂ O	5,38	6,70	—	5,44	6,32	—	5,24	6,38	6,71	5,25	6,16	5,98
H ₂ O ⁻	—	—	—	—	—	—	} 0,30	0,12	0,12	} 0,37	} 1,00	0,30
H ₂ O ⁺	—	—	—	—	—	—		0,86	0,86			0,90
P ₂ O ₅	0,06	0,04	—	0,06	0,08	—	—	Следы	Следы	—	Следы	Следы
Сумма	99,13	100,20	—	99,30	99,29	—	99,94	99,79	100,21	100,24	100,3	99,59
Нераствори- мый остаток по отноше- нию к взя- той навеске (в вес. %)	—	—	—	—	—	—	0,51	7,92	—	0,27	10,00	—

Аналитик Е. А. Кульчицкая

П р и м е ч а н и я: 1. Пробы нефелина, взятые для анализов I и II, растворялись в слабой соляной кислоте. Вес нерастворимого остатка вычитывался из общего веса навески. Состав нефелина рассчитывался из навески за вычетом нерастворимого остатка.

2. I — состав нефелина по данным анализа солянокислых вытяжек из прозрачных участков кристаллов (зона а); II — состав нефелина на участках с включениями (зона б); III — валовой состав кристаллов нефелина на участках развития включений (зона б).

3. Определение FeO в анализах I и воды в анализах I и II производилось из отдельных навесок без растворения их в кислоте и отделения включений.

а Fe₂O₃ увеличивается¹. Вода (0,3—1,2%) установлена в пробах нефелина из обеих зон, причем более высокое содержание ее характерно для зоны б.

Более существенные расхождения устанавливаются при сравнении химических составов нефелина из зон а и б, полученных путем анализа солянокислых вытяжек (табл. 1, анализы I и II). Так, в нефелине из зоны б содержание железа в пересчете на Fe₂O₃ уменьшается в 2—10 раз по сравнению с зоной а. Особенно это заметно в кристалле 14, для которого характерно наиболее высокое содержание железа. Кроме того, в нефелине из зоны б заметно уменьшается количество SiO₂ при одновременном увеличении Al₂O₃ и K₂O. Содержание CaO и Na₂O в нефелине из обеих зон остается примерно одинаковым.

ЭПР и спектры оптического поглощения

Спектры ЭПР и оптического поглощения исследовались для установления позиции железа в структуре нефелина. Использовать эффект Мёссбауэра в данном случае не представлялось возможным из-за низкого содержания железа в исследуемых образцах.

¹ Определение закисного железа в зоне а производилось из отдельных навесок после их спекания. Если учесть незначительное содержание нерастворимого остатка в пробах из этой зоны, то можно полагать, что полученные результаты отвечают истинному содержанию закисного железа в прозрачном нефелине.

Обсуждение результатов

В результате выполненных исследований получено достаточно данных для суждения о природе включений эгирина в изученных объектах. При этом принимаются во внимание те положения, которые были взяты в качестве исходных при определении методики и целей исследований.

Наиболее существенным результатом является установление закономерного изменения химического состава и структурного состояния нефелина на участках размещения включений эгирина (зона *б*) по сравнению с составом нефелина в прозрачных частях кристаллов (зона *а*). Эта закономерность четко наблюдается во всех изученных кристаллах и выражается в том, что в составе нефелина из зоны *б* по сравнению с зоной *а* возрастает содержание K_2O и Al_2O_3 , уменьшается количество SiO_2 и резко падает содержание железа. В то же время валовый состав зоны *б* отвечает химическому составу нефелина и включений и по содержанию главных компонентов и железа практически соответствует химическому составу прозрачного нефелина из зоны *а*. При этом железо в зоне *а*, входящее в состав нефелина в качестве структурной примеси, как было установлено при изучении спектров оптического поглощения и ЭПР, в зоне *б* оказывается почти полностью связанным во включениях эгирина.

Исчезновение напряжений в структуре нефелина на участках развития включений эгирина, вызывающих искажения кремнекислородных тетраэдров в структуре прозрачных участков кристаллов, свидетельствует о том, что процесс образования включений сопровождался общим упорядочением структуры нефелина. Эта упорядоченность проявляется и в том, что из структуры нефелина при образовании включений удаляется изоморфная примесь железа. Совокупность установленных фактов приводит к выводу, что образование включений эгирина происходило за счет вещества нефелина в результате структурных превращений в краевых частях кристаллов. По своему механизму этот процесс, по-видимому, аналогичен распаду твердого раствора, и включения эгирина следует отнести к экссолуционному типу (Смит, 1956). Таким образом, прозрачные участки в кристаллах представляют собой реликты нефелина, состав и структура которого отвечают условиям его первичной кристаллизации.

Другие возможные варианты возникновения включений эгирина — за счет проникновения в кристаллы нефелина растворов, содержащих железо, или как результат совместной кристаллизации нефелина и эгирина, являются менее доказательными. Первому из этих предположений противоречит одинаковое содержание железа в разных участках кристаллов, независимо от того, есть ли там включения эгирина. Второе допущение отвергается уже самим характером размещения в кристаллах участков с включениями эгирина: неправильной зональностью и отсутствием связи включений с зонами роста кристалла-хозяина, приуроченностью отдельных участков с включениями к узким зонам — «языкам», проникающим в прозрачный нефелин вдоль залеченных трещин, а также ориентировкой включений. Кроме того, одно и то же содержание железа в зонах *а* и *б* не подтверждает в данном случае предположения о наличии в период кристаллизации нефелина этапов, когда минералообразующая среда заметно обогащалась железом.

Наличие в подавляющем большинстве просмотренных кристаллов реликтов первичного прозрачного нефелина говорит о том, что структурные превращения и выделение включений эгирина не связаны с общим снижением температуры в остывающем пегматитовом теле, так как в этом случае процесс распространился бы на весь объем кристалла. Нарушение равновесия в структуре первичного нефелина и образование включений эгирина, по-видимому, являются следствием метаморфизирующего воздействия на нефелин постмагматических растворов, содержащих калий. В пользу этого

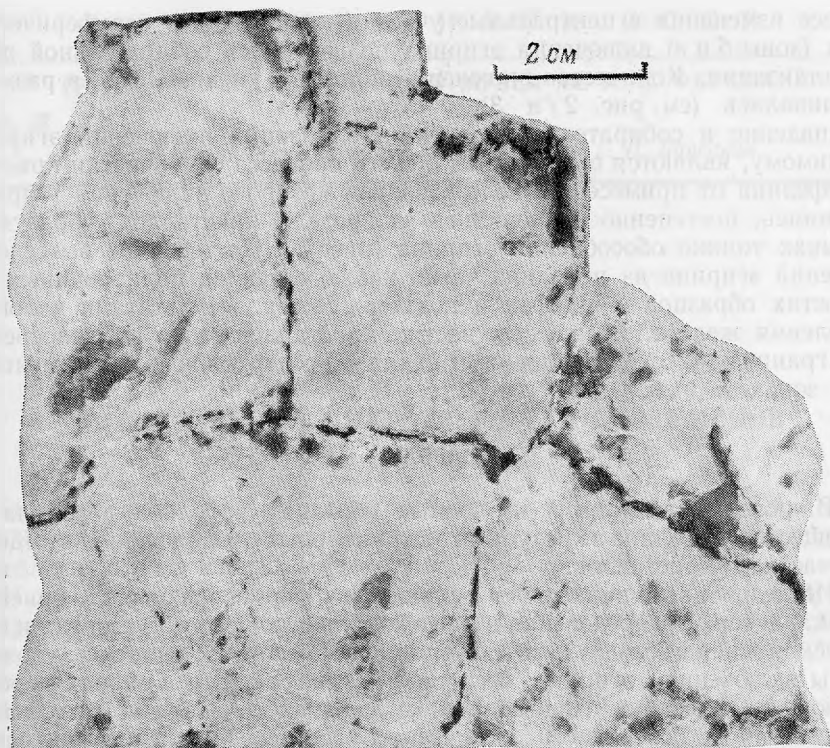


Рис. 5. Обособление эгирина на границе кристаллов нефелина (жила пегматита 8)

свидетельствует четкая парагенетическая связь включений эгирина с включениями калиевого полевого шпата (последние, вероятно, возникли в результате метасоматического взаимодействия раствора с веществом первичного нефелина), возрастание содержания калия в составе нефелина на участках развития включений и увеличение содержания воды на тех же участках. Последнее обстоятельство вызвано, вероятно, наличием небольшого количества вторичных минералов, содержащих воду (гидронфелин, цеолиты, анальцит и др.), которые образовались в процессе воздействия растворов на нефелин, либо проникновением молекулы воды в дефекты кристаллической решетки нефелина.

Процесс образования включений эгирина в нефелине представляется следующим образом. В постмагматическую стадию развития пегматитового процесса ранее выделившиеся кристаллы нефелина подверглись воздействию метаморфизирующих растворов, путями проникновения которых служили трещины (главным образом спайности) в нефелине. Процесс изменения нефелина начинался с периферии и постепенно продвигался в глубь кристалла. Те кристаллы нефелина, которые были заключены в плотный чехол агрегата темно-зеленого игольчатого эгирина, оказались изолированными от воздействия растворов и изменению не подверглись. Так как кристаллизация темно-зеленого игольчатого эгиринового чехла относится к заключительному этапу магматического минералообразования, это прямо указывает на приуроченность процесса изменения нефелина к постмагматической стадии формирования пегматита.

Можно полагать, что рассмотренный процесс изменения нефелина был сравнительно кратковременным, так как в большинстве кристаллов сохранились реликты первичного прозрачного нефелина.

Образование включений начиналось с выделения мельчайших кристалликов эгирина на переднем крае фронта изменения. По мере продвижения

процесса изменения в центральные участки кристаллов в периферических частях (зоны б и в) включения эгирина подвергались собирательной перекристаллизации. Количество включений при этом уменьшалось, а размеры увеличивались (см. рис. 2 и 3).

Выпадение и собирательная перекристаллизация включений эгирина, по-видимому, являются выражением общего процесса самоочистки кристаллов нефелина от примесей, в ходе развития которого включения эгирина, укрупняясь, постепенно вытеснялись за пределы кристаллов, образуя на их стыках тонкие обособления эгирина (рис. 5). Постепенное вытеснение включений эгирина из нефелина четко наблюдается на полированных по верхностям образцов в шлифах и подтверждается результатами валового определения железа. В краевых частях кристаллов (зона в), непосредственно граничащих с обособлениями эгирина, содержание железа меньше, чем в зонах а и б.

ВЫВОДЫ

1. Включения эгирина в изученных образцах нефелина возникли за счет вещества нефелина в результате структурных превращений в отдельных участках кристаллов.

2. Исследованные включения эгирина по форме, размерам, ориентировке, характеру распределения в пределах участков своего развития и специфическому парагенезису с включениями калиевого полевого шпата аналогичны включениям эгирина, беспорядочно рассеянным в зернах породообразующего нефелина горных пород Хибинского щелочного массива. Эта аналогия и особенности химического состава хибинского нефелина (Галахов, 1962; Дорфман, 1962; Дудкин и др., 1964) дают основание полагать, что процесс образования включений эгирина в результате структурных превращений в нефелине широко проявился в горных породах Хибинского массива на стадии их постмагматического (возможно, автоматоматического) изменения. Представляется, что при использовании данных химического состава нефелина для решения петрологических вопросов включения эгирина следует рассматривать не как постороннюю механическую примесь, лишенную информативного смысла, а как возможную часть первичного состава нефелина.

Литература

- Альтшулер С. А., Козырев Б. М. Электронный парамагнитный резонанс. Гос. изд-во физ.-мат., лит.-ры, 1961.
- Бальхаузен К. Введение в теорию поля лигандов. Изд-во «Мир», 1964.
- Галахов А. В. Рисчорриты Хибинского щелочного массива. Изд-во АН СССР, 1959.
- Галахов А. В. Особенности породообразующего нефелина Хибинского щелочного массива. — В сб. «Материалы по минералогии Кольского п-ова», вып. 3. Изд-во Кольск. фил. АН СССР, 1962.
- Дорфман М. Д. Минералогия пегматитов и зон выветривания в ийолит-уртитях горы Юкспор Хибинского массива. Изд-во АН СССР, 1962.
- Дудкин О. Б., Козырева Л. В., Померанцева Н. Г. Минералогия апатитовых месторождений Хибинских тундр. Изд-во «Наука», 1964.
- Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд-во Харьковск. ун-та, 1950.
- Иванова Т. Н. Апатитовые месторождения Хибинских тундр. Госгеолтехиздат, 1963.
- Икорский С. В. Органическое вещество в минералах изверженных горных пород (на примере Хибинского щелочного массива). Изд-во «Наука», 1967.
- Ляхов Ю. В., Пизнюр А. В. О сингенетических твердых включениях в минералах. Сб. Львовск. ун-та, 1964, вып. 2, № 18.
- Смит Ф. Г. Геологическая термометрия по включениям минералов. ИЛ, 1956.
- Vancroft G. M., Borns R. G. Interpretation of the electronic spectra of iron in pyroxines. — Amer. Min., 1967, 52.
- Fayer G. H., Monning P. G., Nickel E. H. The polarized optical absorption spectra of tourmaline, cordierite, chloritoid and vivianite. — Amer. Min., 1968, 53, № 7, 8.