

DOI: 10.17076/tm14_38

ФОРМЫ АПАТИТА В РУДАХ ХИБИНСКОГО МАССИВА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОБОГАЩЕНИЕ

Нерадовский Ю. Н., Компанченко А. К., Чернявский А. В.

ГИ ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты

Апатит, важнейший промышленный минерал, постоянно привлекает внимание исследователей с различных позиций [7,9,4,5,6,8,3,16,15,14,12,18,11]. Наибольшее количество работ посвящено исследованиям химического состава апатита, как уникального коллектора стронция и редких земель, а также морфологии кристаллов, минеральным ассоциациям и генезису. В данной работе рассмотрены новые аспекты связи морфоструктурных особенностей апатита с технологическим процессом.

Общие сведения

Апатит – $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{F}$ – основное полезное ископаемое Хибинских тундр. Минерал присутствует во всех породах массива в виде акцессорной примеси, в том числе: в нефелиновых сиенитах в объеме 0.26–0.34%, в ричесорритах – 0.36%, в мельтейгит-уртитах 1.68–1.87% [16]. В апатит-нефелиновых рудах содержание апатита варьирует от 10 до 100%. Акцессорный апатит в породах Хибинского массива представлен в основном призматическими зернами

размером 0.01–0.3 мм. Реже встречаются игольчатые кристаллы размером 0.1–4 мм. Зерна апатита располагаются в виде включений в порообразующих минералах по краям зерен. Взаимоотношение апатита с порообразующими минералами имеет преимущественно реакционный характер. Коррозионные структуры усложняются в ряду: апатит-нефелиновые руды – титанит-apatит-нефелиновые руды – ювиты и рисчорриты. В апатит-нефелиновых рудах выделяется три разновидности апатита: сахаровидный – зерна призматического облика, размером 0.05–0.3 мм; игольчатый – в сечении 0.1–3 мм, длиной 4–25 мм и грубозернистый – размером 2–8 мм, изометричной формы. Исследования поверхности кристаллов апатита показало, что все разновидности имеют признаки совместной кристаллизации в виде ступенек роста, борозд, вициналей и др. Главными кристаллографическими формами апатита в породах и рудах являются: призма $m \{10\bar{1}0\}$, пинакоид $p \{0001\}$ и дипирамиды $x \{10\bar{1}1\}$ и $s \{11\bar{2}1\}$. Кристаллографические формы апатита усложняются с переходом в низкотемпературные ассоциации, это выражается

в увеличении числа граней, интенсивном развитии грани пинакоида $p \{0001\}$ и появлении третьей дипирамиды $n \{21\bar{3}1\}$. Вторичные формы апатита, образованные под воздействием наложенных процессов, имеют признаки дробления, чешуйчатости и развития тонкоигольчатых агрегатов желтовато-зеленого цвета.

Текстуры, структуры и минеральный состав апатит-нефелиновых руд

Апатит-нефелиновые руды делятся на 12 природных типов [17] (рис.1). В классификации использованы текстурные, морфологические, размерные и вещественные признаки.

Наиболее распространенными типами являются: линзовидно-полосчатые, брекчиевые и пятнистые руды (табл. 1, рис. 2).

В богатых рудах апатит составляет до 75% объема (рис. 1) и образует полнокристаллический агрегат, панидиоморфнозернистой структуры, в котором располагаются включения различных минералов и пород (рис. 3, 4): нефелин, пироксен, титанит, уртит, мельтейгит и другие. Средний размер зерна основного апатита составляет около 1 мм.

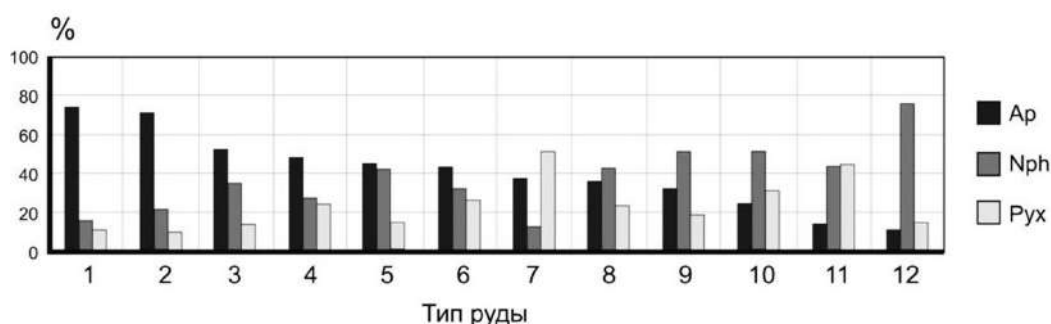


Рис. 1. Типы и минеральный состав руд Хибинских месторождений: 1 – пятнистые; 2 – пятнисто-полосчатые; 3 – полосчатые; 4 – брекчиевые; 5 – линзовидно-полосчатые; 6 – контактная брекчия; 7 – сфен-апатитовые; 8 – крупноблоковые; 9 – мелкоблоковые; 10 – сетчатые; 11 – сфеновый ийолит; 12 – уртит с апатитом. Ap – апатит; Nph – нефелин; Pux – пироксены и примеси (слюды, лампрофиллит, амфиболы и др.)

Таблица 1

Распространенность различных типов руд (%) на некоторых месторождениях Хибин [17]

Типы руд	Месторождения			
	Кукисвумчорр	Юкспор	Расвумчорр	Коашва
Пятнистые	15.2	4.4	19.0	19.4
Брекчии	5.6	41.0	28.0	11.6
Линзовидно-полосчатые	46.3	32.7	27.0	20.7
Сетчатые	10.1	1.3	0.9	–
Крупноблоковые	9.7	8.3	7.0	4.8
Уртиты с апатитом	2.2	1.0	4.0	–
Сфен-апатитовые	4.2	–	–	11.4

Рис. 2. Текстуры главных типов руд Хибинских месторождений: а – линзовидно-полосчатая, б – брекчиевая, в – пятнистая. Фото полированных штуфов

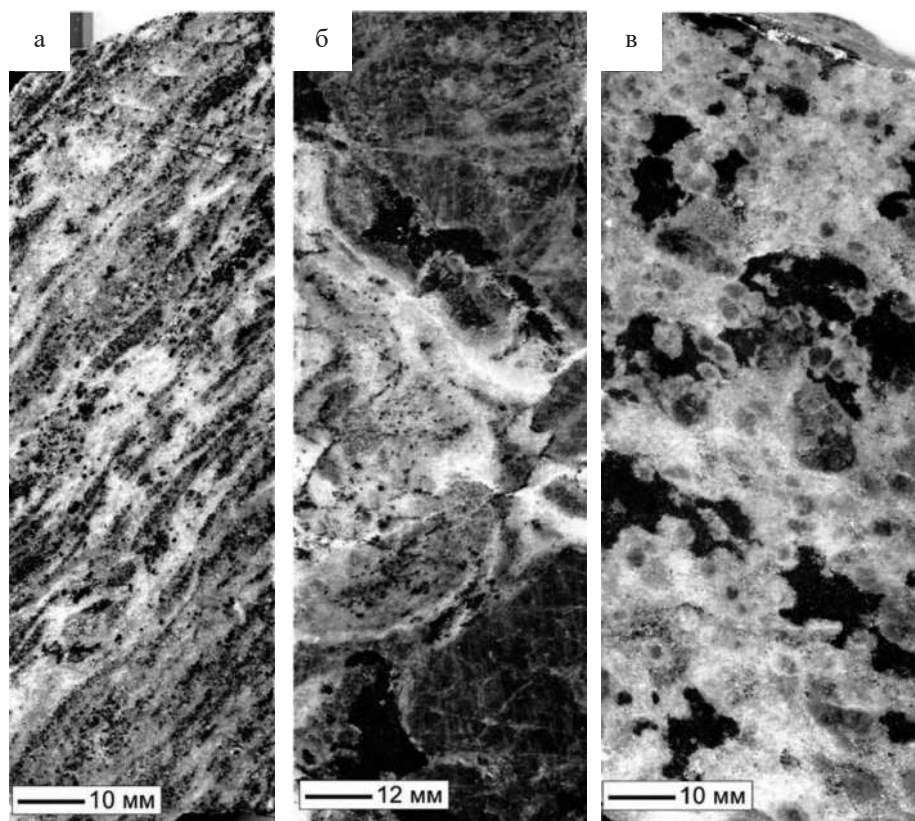
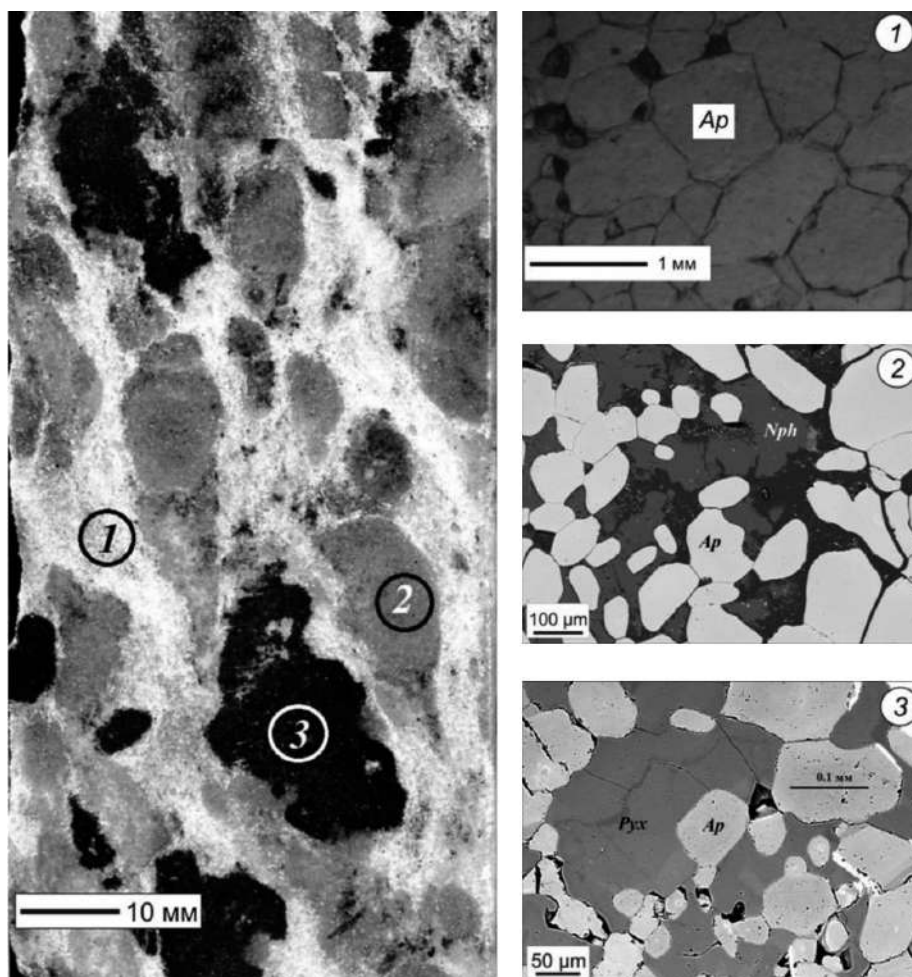


Рис. 3. Структурные особенности апатитовой руды. Области, обозначенные цифрами на изображении полированного штуфа, соответствуют фотографиям в правом столбце: 1 – основной апатит, фото в проходящем свете; 2 – включения апатита в нефелине, СЭМ изображение; 3 – включения апатита в пироксене, СЭМ изображение



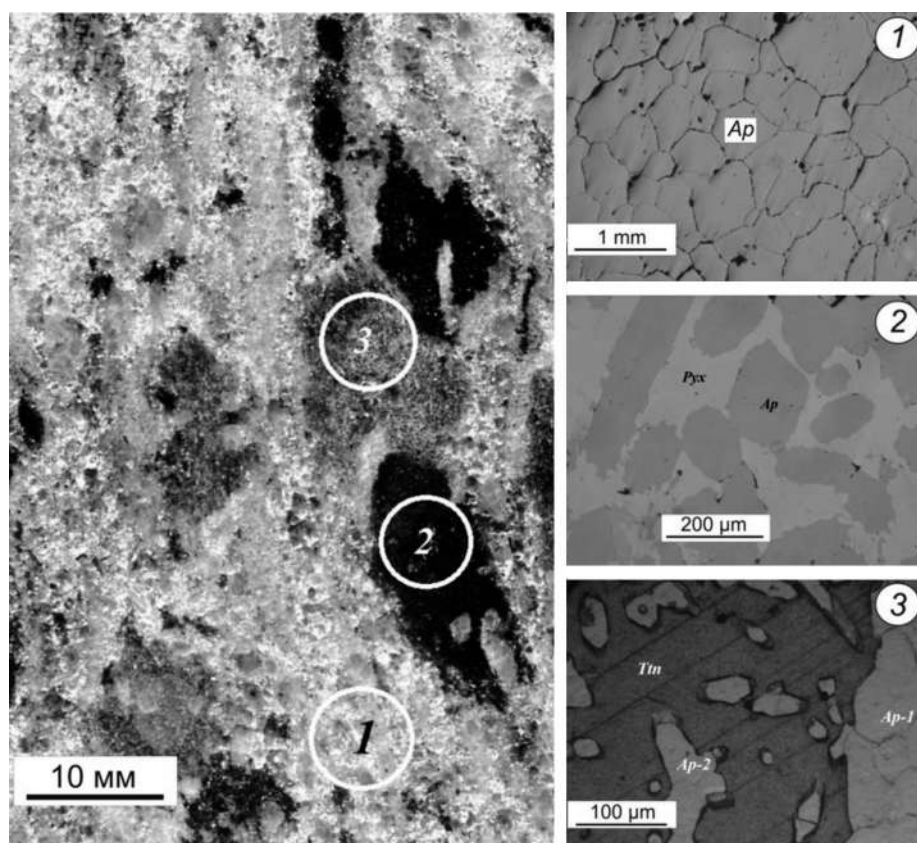


Рис. 4. Структурные особенности апатитовой руды. Области, обозначенные цифрами на изображении полированного штуфа, соответствуют фотографиям в правом столбце: 1 – основной апатит, фото в отраженном свете; 2 – включения апатита в пироксене, фото в отраженном свете; 3 – включения апатита в титаните, фото в проходящем свете

Включения в апатите других минералов представляют угловатые, округлые, линзовидные и прочие по форме выделения, распределенные равномерно или ориентировано. Они, как правило, изолированы друг от друга прослойкой апатита. Размеры включений широко варьируют в пределах 5–30 мм.

Исследования породообразующих минералов, расположенных в массе апатита, показали, что все они содержат включения апатита, более мелкие, чем зерна основного апатита (рис 3, 4). Форма этих сростаний аналогична пойкилитовым кристаллам. Размеры апатита во включениях составляют в среднем 0.2 мм, в 5 раз меньше размера зерен основного апатита. Таким образом, апатит-нефелиновые руды содержат две формы апатита: 1) основной, свободный крупнозернистый апатит и 2) «пойкилитовый», мелкозернистый апатит, включенный в нефелин, пироксен и титанит. Это вызывает определенные сложности при обогащении руд.

Особенности раскрытия апатита при измельчении апатит-нефелиновых руд

В соответствие с физическими свойствами (табл. 2), минералы должны раскрываться в последовательности: апатит, нефелин, пироксен,

полевые шпаты. Однако этого не происходит. Исследования показывают, что апатит раскрывается неравномерно и, частично, позднее нефелина и пироксена.

Опытные данные измельчения апатит-нефелиновых руд показывают, что апатит раскрывается в две стадии. Например, в работе [19] установлено, что вначале измельчения образуется два класса частиц (-0.4 и $+0.4$ мм), с почти равным распределением (51 и 49%) соответственно, в первый из которых переходит 70% апатита в раскрытой форме, во втором остается 30% апатита, в сростках с нефелином. Сростки раскрываются позднее при уменьшении размера фракции измельчения. Исследования Елбэндари А. М. [10], свидетельствуют, что раскрытие апатита хорошо идет вначале, в крупной фракции $-0.2+0.16$ мм, достигая 81% свободной фазы, а затем ухудшается во фракциях $-0.16+0.045$ до 65%. В этих фракциях отмечается рост количества биминеральных сростков апатита с нефелином и пироксенами до 26%. Дальнейший рост выхода свободного апатита происходит только при измельчении руды до фракции -0.045 мм. Данные тонкого грохочения в цикле измельчения АО «Апатит» [13] показывают, что раскрытый апатит в питании

флотации составляет около 45 % и сосредоточен во фракции –0.071 мм, остальные 55 % составля-

ют зерна и сростки апатита с порообразующими минералами во фракциях +0.071–0.400.

Таблица 2

Физические свойства минералов апатит-нефелиновых руд

Минерал	Твердость по Моосу	Твердость по Виккерсу Н, кг/мм ²	Спайность	Сингония	Плотн., ρ, кг/м ³	Модуль продольной упругости (Юнга) E, МПа	Предел прочности при одноосном сжатии, σ _{сж} , МПа	Предел прочности при растяжении, σ _р , МПа
Апатит	5	523	Несоверш хрупок	гекс	3.263·10 ³	4.34·10 ⁴	32	2.5
Нефелин	5–6	750	Несоверш Хрупок	гекс	2.635·10 ³	7.13·10 ⁴	180	19.6
Пироксен	5	822	Ясная	мон	3.563·10 ³	14.68·10 ⁴	190	22.0
Титанит	5.5	679	Ясная	мон	3.50·10 ³			
Щелочной полевой шпат	6.2	970	Соверш	трикл	2,551·10 ³	6.90·10 ⁴	220	27.3
Титано-магнетит		735	Весьма несоверш хрупок	куб	4.7·10 ³	15.20·10 ⁴		
Сода	1–1.5		Несоверш	мон	1.45·10 ³			
Содалит	5.5–6		Средняя	куб	2.22·10 ³			
Натролит	5–5.5		Средняя	ромб	2.35·10 ³	7.4·10 ⁴		
Биотит	2–3		Весьма соверш	мон	3.07·10 ³	6.9–7·10 ⁴		

Справочники: [1, 2].

Причиной сложного раскрытия апатита является наличие двух форм: крупнозернистого свободного и мелкозернистого, скрытого во включениях в пойкилобласти. Пойкилобласти рассеяны в массе свободного апатита и являются биминеральными агрегатами. Размеры их 5–30 мм, т. е. они могут появиться в продуктах измельчения в кусках разного размера. Их присутствие создает анизотропию крепости руды. До обособления пойкилобласт идет разрушение свободного апатита. Затем начинают разрушаться пойкилобласти, в соответствии с понижением прочности минералов, которые их составляют, и высвобождается мелкозернистый апатит. Пойкилобластические структуры появляются в виде твердых частиц (сростков с включениями апатита). Они тормозят раскрытие «пойкилитового» апатита и способствуют переизмельчению свободного раскрытого апатита. Размеры включений апатита в пойкилобласти в среднем 0.2 мм, поэтому они начинают раскрываться только при измельчении до –0.1 мм. Таким об-

разом, для раскрытия тонкозернистого апатита необходим более тонкий помол.

Выводы

Апатит-нефелиновые руды представляют пример технологически сложных для обогащения продуктов, вследствие сочетания особых морфо-структурных факторов и физических свойств минералов. Особенностью руд является присутствие двух форм апатита – свободного и «пойкилитового». Главный минерал, свободный апатит, имеет наиболее низкую прочность и склонен к быстрому измельчению. Присутствие пойкилобластов нефелина, пироксена и титанита с включениями апатита обуславливает необходимость дополнительной работы мельниц для измельчения более прочных минералов и раскрытия мелкозернистого апатита. В этот период происходит переизмельчение свободного апатита. Для оптимизации процесса требуется проведение мероприятий по выводу готового к флотации апатита из процесса измельчения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турчанинов И. А., Воларович М. П., Бондаренко А. Т., Ковалева Г. А., Медведев Р. В., Томашевская И. С., Тюремнов В. А. Атлас физических свойств минералов и горных пород Хибинских месторождений // Изд-во Наука, Ленингр. отд., Л., 1975. 71 с.
2. Бетехтин А. Г. Курс минералогии. М.: Гос. науч.-тех. издат. литературы по геологии и охране недр, 1961. 539 с.
3. Боруцкий Б. Е. Существенно стронциевый апатит из Хибинских тундр // Материалы по минералогии Кольского полуострова. Вып. 4. М.-Л.: Наука, 1965. С. 143–151.
4. Денисов А. П., Дудкин О. Б., Елина Н. А., Кравченко-Бережной Р. А., Полежаева Л. И. О зависимости физических свойств апатита от примеси редких земель и стронция // Геохимия. 1961. № 8. С. 666–676.
5. Дудкин О. Б., Козырева Л. В., Померанцева Н. Г. Минералогия апатитовых месторождений Хибинских тундр. М.-Л.: Наука, 1964. 235 с.
6. Дудкин О. Б., Померанцева Н. Г. Акцессорные апатит и сфен из ийолит-уртитов Хибинского массива // Материалы по минералогии Кольского полуострова. Вып. 4. М.-Л.: Наука, 1965. С. 132–142.
7. Дудкин О. Б. Новые данные по минералогии хибинского апатита // Материалы по минералогии и металлогении Кольского полуострова. Вып. 1. Апатиты: КФ АН СССР, 1970. С. 267–272.
8. Дудкин О. Б., Пахомовский Я. А., Ганнибал Л. Ф. Тонкораспыленный апатит в силикатах щелочных пород // Материалы по минералогии и геохимии щелочных комплексов пород Кольского полуострова. Апатиты: КФАН СССР, 1975. С. 183–190.
9. Дудкин О. Б. Технологическая минералогия комплексного сырья на примере месторождений щелочных плутонов. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1996. 134 с.
10. Елбэндари А. М. Повышение комплексности переработки фосфатных руд флотационным методом // Дисс. к.т.н., Санкт-Петербург, 2021. С.-Петербургский горный университет. 134 с.
11. Захарова А. А., Войтеховский Ю. Л. Методика прогнозирования обогатимости апатитовых руд (Кировский рудник, Кольский полуостров) // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 27–30.
12. Калугин А. И. Исследование и обоснование оптимальных условий селективной флотации апатита из апатито-нефелиновых руд. Дисс. к.т.н. 2002. 150 с.
13. Калугин А. И., Гумениченко К. М., Барабаш А. Ю., Арсентьев С. С. Опыт внедрения технологии тонкого грохочения в цикле измельчения апатит-нефелиновой руды // Горный журнал. 2014. № 10. С. 52–57.
14. Когарко Л. Н. Редкоземельный потенциал апатита в месторождениях и отходах производства апатито-нефелиновых руд Хибинского массива // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2019. Т. 16. С. 271–275.
15. Коноплева Н. Г., Иванюк Г. Ю., Пахомовский Я. А., Яковенчук В. Н., Михайлова Ю. А. Типоморфизм фторапатита в Хибинском щелочном массиве (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2013. № 3. С. 65–83.
16. Костылева-Лабунцова Е. Е., Боруцкий Б. Е., Соколова М. Н., Шлюкова З. В., Дорфман М. Д., Дудкин О. Б., Козырева Л. В. Минералогия Хибинского массива (минералы). Т. 2. М.: Наука, 1978. 586 с.
17. Минеральные месторождения Кольского полуострова / Г. И. Горбунов и др. Л.: Наука, 1981. 272 с.
18. Нерадовский Ю. Н., Компанченко А. А., Байбикова Ю. Б., Базай А. В. Исследование структурно-химических особенностей фторапатита Хибинского массива как потенциального сырья для обогащения // Обогащение руд. 2020. № 4. С. 14–20.
19. Ракаев А. И., Чепкаленко Н. А. Интенсификация цикла рудоподготовки при комплексном обогащении апатито-нефелиновых руд // Серия: Инновационный потенциал Кольской науки. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. С. 106–111.
20. Романчев Б. П., Когарко Л. Н., Каменев Е. А., Шевалеевский И. Д. Генетические типы апатита коашвинского месторождения // Труды минералогического музея им. А. Е. Ферсмана. 1975. Вып. 24. С. 207–211.