

УДК 622.7 (470.22)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ КАРЕЛИИ

В. В. ЩИПЦОВ, Е. Е. КАМЕНЕВА, Л. С. СКАМНИЦКАЯ

Институт геологии Карельского научного центра РАН

Рассмотрены основные теоретические и практические вопросы обогащения минерального сырья Карелии. Обобщен опыт геолого-технологических исследований основных типов индустриальных минералов Карелии – полевого шпата, кианита, графита, граната, ильменита. Изложены геолого-минералогические основы технологической оценки индустриальных минералов. Оценена степень технологической изученности руд с учетом современных представлений в области теории и практики обогащения руд. Сформулированы основные направления развития технологий обогащения труднообогатимых руд сложного вещественного состава. Показаны перспективы нового научного направления теории обогащения руд – энергетического воздействия на минералы и минеральные ассоциации с целью интенсификации процесса. Приведены результаты исследований направленного изменения свойств минералов путем воздействия низкотемпературной плазмой и ультразвуком.

С позиций технологической минералогии рассмотрены газово-жидкие включения в минералах. Оценено их влияние на процесс обогащения. Изложены результаты исследований по удалению газово-жидких включений путем термообработки, СВЧ-излучения, воздействия мощными электромагнитными импульсами и радиационным излучением.

V. V. SCHIPTSOV, E. E. KAMENEVA, L. S. SKAMNITSKAYA. THEORY AND PRACTICE OF BENEFICATION OF RAW MATERIALS FROM KARELIA

Basic theoretical and practical problems in the dressing of Karelian mineral products are discussed. Experience in the geological and technological study of the main types of Karelian industrial minerals, such as feldspar, kyanite, graphite, garnet and ilmenite, is generalized. A geological and mineralogical basis for the technological evaluation of the industrial minerals is provided. The extent of the technological study of the ores is assessed with regard for the modern concepts of the theoretical and practical aspects of ore dressing. Basic trends in the development of dressing technologies for poorly dressable ores that have a complex mineralogical composition are formulated.

A new scientific trend in the ore dressing theory – the effect of energy on minerals and mineral associations to intensify the process – is shown. The results of the study of directed changes in the properties of minerals, caused by low-temperature plasma and ultrasound, are presented.

Gas-liquid inclusions in the minerals are discussed from the point of view of technological mineralogy. Their effect on dressing is assessed. The results of the study of the removal of gas-liquid inclusions by thermal treatment, SHF-radiation, powerful electromagnetic impulses and radiation emission are discussed.

Ключевые слова: обогащение минерального сырья, индустриальные минералы Карелии, направленное изменение свойств минералов, удаление газово-жидких включений.

Введение

Цель обогащения минерального сырья заключается в том, чтобы раскрыть природные сростания минералов и разделить их между собой. Перед тем как получить конечный продукт, необходимо пройти на практике две стадии – рудоподготовку и собственно обогащение. Рудоподготовка включает в себя измельчение руды с целью раскрытия сростков минералов для последующего разделения (обогащения), а обогащение – выделение минералов из руды (разделение минералов) на основе их различия по типоморфному признаку и другим свойствам. И если руда не обогащается, то она не находит практического использования.

В России состояние горноперерабатывающей отрасли становится весьма напряженным, так как на многих действующих горно-обогажительных комбинатах запасы богатых руд истощаются или практически полностью исчерпаны, и в промышленную переработку вовлекаются бедные и труднообогащаемые руды сложного вещественного состава с низким содержанием полезных компонентов, в том числе и техногенного генезиса. Добыча и обогащение таких руд связаны с ростом затрат при снижении извлечения полезных компонентов, а получаемые минеральные концентраты не всегда отвечают техническим условиям и требованиям экологической безопасности. В силу сказанного на современном этапе освоения недр появляется много новых и достаточно сложных проблем в теоретическом и практическом смысле.

Современная промышленность предъявляет высокие требования к качеству минерального сырья. Это имеет сегодня большое, если не решающее, значение в определении направлений использования полезных ископаемых и обуславливает необходимость разработки новых эффективных технологий обогащения руд с получением минеральных концентратов, отвечающих высоким требованиям производителей.

Двигаясь в этом направлении, необходимо решать много нестандартных задач. Одна из главных задач состоит в повышении контрастности свойств минералов, что является необходимым для условий разделения минералов, в первую очередь флотацией (Чантурия, Вигдергауз, 2005). В практике обогащения полезных ископаемых флотация и сегодня является основным методом.

В целом для решения этих задач выделяются три области исследований:

- Технологическая минералогия
- Совершенствование технологических процессов: разработка и научное обоснование новых технологических подходов и технических решений
- Интенсификация технологии обогащения различных руд на основе направленного изменения свойств минералов.

Типоморфные свойства минералов – связующее звено между природным типом руд и выбором оптимальной технологии их обогащения (Изоитко, 1997). Выделяются типоморфные свойства двух порядков. Первый порядок – это признаки, зависящие от условий образования. К ним относятся химический состав, присутствие элементов-примесей, структура (параметры, дислокации и т. п.), конституция, структурно-текстурные особенности породы (морфологический тип текстуры, типы сростаний минералов, морфология и гранулометрия минеральных агрегатов), степень выветривания, поверхностные пленки и другие свойства минералов и горных пород. Второго порядка – это признаки, являющиеся производными от первого порядка. К ним относятся физические и механические типоморфные свойства (цвет, прозрачность, контактная электризация, твердость, микротвердость, хрупкость, упругость, пластичность, пористость, сорбция, адсорбция, растворимость, реакционная способность, коэффициент анизотропии, люминесцентность, радиоактивность и др.).

В этих условиях особую актуальность приобретают исследования, направленные на дальнейшее развитие теоретических основ и практики обогащения руд сложного вещественного состава, к которым относятся руды Карелии.

Прогнозная оценка минерально-сырьевых ресурсов Карелии и проблемы их комплексной переработки

Карелия перспективна на многие виды полезных ископаемых. На государственном балансе числится 227 месторождений, в том числе 8 металлических месторождений. Кроме того, выявлено свыше 1000 рудопроявлений.

К ним относятся такие полезные ископаемые, как железные, хромовые, железо-ванадий-титановые, урановые и уран-ванадиевые, олово-полиметаллические, медно-никелевые и осмий-рений-молибденовые руды, золото, платиноиды, алмазы, руды индустриальных минералов – анортозит, апатит, гранат, графит, диатомит, ильменит, кварц, кианит, оливин, родусит-асбест, серный колчедан, тальк, флюорит, шунгит, а также пегматитовое полевошпатовое сырье для фарфоровой, стекольной и фаянсовой промышленности, карбонатное сырье, огнеупорные высококремнистые кварциты, сырье для камнелитейной промышленности и производства минеральной ваты, облицовочный камень, камень на щебень и др. (Новиков, Щипцов, 2004).

За длительный период изучения недр Карелии накоплен обширный фактический материал по геологии и металлогении месторождений и рудопроявлений. Однако, несмотря на это, по сравнению с другими сопредельными регионами Карелия находится на самой ранней стадии реализации своего рудного потенциала.

Действующими предприятиями, осуществляющими обогащение руды, являются ОАО «Карельский окатыш» в г. Костомукше и ЗАО «Чупинский ГОК» в поселке Чупа (Лоухский район). На магнитообогащительной фабрике ОАО «Карельский окатыш» обогащаются магнетитовые кварциты методом мокрой магнитной сепарации. Выпускаемой предприятием продукцией являются железорудные окатыши, получаемые из магнетитового концентрата. На помольно-обогащительной фабрике ЗАО «Чупинский ГОК» из пегматитов методом магнитной сепарации получают относительно небольшие партии полевошпатового и кварц-полевошпатового концентратов.

Все остальные руды Карелии относятся к разряду перспективных и технологически изучались в лучшем случае на стадиях детальной и предварительной разведки. Примерами могут служить месторождения металлов – это Аганозерское месторождение и Шалозерское проявление хромовых руд стратиформного типа с прогнозными ресурсами более 700 млн т руды и содержанием 23–24% Cr_2O_3 , Пудожгорское титаномагнетитовое месторождение со средним содержанием 28,7% $\text{Fe}_{\text{общ}}$, 8,13% TiO_2 , 0,43% V_2O_5 ; молибден-порфиновый геолого-промышленный тип месторождения Лобаш со средним содержанием в руде 0,068% Mo и сопутствующими рением и осмием, концентрации которых представляют практический интерес; урано-ванадиевые руды Средне-Падминского месторождения, Кительское олово-полиметаллическое месторождение, месторождение золота Майское, тальк-магнетитовое Светлоозерское месторождение, графитовое Ихальское месторождение и некоторые другие. Технологические свойства изучаются на стадии поисково-оценочных работ, когда предварительно оценивается вещественный состав и обогатимость руд в ограниченных лабораторных объемах.

Два десятилетия назад Карелия занимала устойчивое положение в производстве полевошпатовой продукции для керамической и стекольной промышленности, в производстве высококачественной листовой слюды. Сегодня утрачены традиционные позиции, но анализ показывает, что реальные результаты длительного периода проведения научно-исследовательских, прогнозно-поисковых и поисково-разведочных работ приводят к выводу об особой роли минерально-сырьевого потенциала региона в сфере промышленных минералов.

На территории Республики Карелия (восточная и юго-восточная части Фенноскандинавского щита) формирование промышленных минералов и горных пород связано с изменением режимов геодинамических обстановок. Основные геологические особенности Фенноскандинавского щита, одной из древних мегаструктур Земли, определились за продолжительный период активного пульсационного

становления земной коры – от ранних этапов формирования (>3,5 млрд лет) со сменой геодинамических режимов во всей последующей истории геологического развития вплоть до кайнозойской активизации.

Минерагеня Карелии достаточно разнообразна по видам проявления. На мегауровне выделены в качестве надрегиональных единиц первого порядка собственные геологические области со своими минерагеническими особенностями: 1) архейские гранито-гнейсовые поля с реактивизированными и слабо реактивизированными областями (перспективы обнаружения месторождений промышленных минералов и пород ограничены, исключая рудогенерирующие пегматитовые системы свекофеннского Беломорского пояса с мусковитовыми и керамическими пегматитами, а также структурно-метаморфические комплексы с кианитом и гранатом); 2) структурно-формационные комплексы лопийских зеленокаменных поясов и связанные с ними типы месторождений промышленных минералов метаморфогенного и гидротермально-метасоматического генезиса (графит, кианит, пирит, кварц, гранат, тальк, тальковый камень, геллефлинта); 3) области развития свекокарельских осадочно-вулканогенных и вулканических толщ (метаморфизованные и слабометаморфизованные месторождения промышленных минералов и горных пород первично осадочного и вулканогенного происхождения – кварциты, графит, карбонатные породы, тальк, шунгитсодержащие сланцы, кварцевые порфиры); 4) осадочные и вулканогенные породы рифейско-вендского комплекса (месторождения промышленных минералов и горных пород, главным образом, метаморфического и осадочного происхождения, а также захороненных кор выветривания – каолин, кварциты, карбонатные породы); 5) дифференцированные интрузии от ультраосновного до кислщелочного и карбонатного состава архейско-протерозойского периода (месторождения промышленных минералов магматогенного, метаморфогенного и гидротермально-метасоматического генезиса – апатит, хромит, ильменит, магнетит, оливин, серпентинит, родусит-асбест, кварц, тальковый камень, нефелиновый сиенит); 6) фанерозойские осадочные комплексы (месторождения промышленных минералов – глины, диатомиты, сапропель) (Щипцов, 2005).

Изучением технологических свойств руд Карелии занимались «Механобр», ВИМС, ГИГХС, Горный институт Кольского НЦ РАН, ВНИИне-руд, ВНИИХТ и другие организации.

Начиная с 60-х годов прошлого столетия в Институте геологии Карельского научного центра РАН систематически изучаются вещественный состав и технологические свойства руд Карельского региона на разных стадиях геологических работ. Накоплен большой фактический

Таблица 1. Состав микроклиновых концентратов из некоторых месторождений Карелии

Оксиды	Линнаваара	Кюрьяла	Брусничное	Люппико	Хетоламбино	Слюдяной Бор
Fe ₂ O ₃	0,03–0,23	0,08	0,14	0,05–0,21	0,04–0,17	0,05–0,37
Na ₂ O	2,5–2,62	3,01	3,12	2,6–3,23	1,84–3,42	2,33–3,06
K ₂ O	8,02–8,24	12,00	10,16	8,83–10,74	6,02–11,94	9,20–12,60
K ₂ O + N ₂ O	10,86	15,01	13,28	11,43–13,97	8,00–13,29	10,17–15,08
K ₂ O/N ₂ O	3,1–3,23	3,99	3,26	3–3,4	2,2–6,1	3,1–5,7

материал по вещественному составу и обогатимости различных типов руд.

Проведенными комплексными исследованиями показано, что в Карелии имеются реальные предпосылки для развития минерально-сырьевой базы по многим видам полезных ископаемых. Большое значение могут иметь объекты с весьма значительными запасами бедных и труднообогатимых руд, для которых на сегодняшний день не разработаны эффективные технологии обогащения и переработки.

Таким образом, разработка новых экологически безопасных технологий комплексного обогащения индустриальных минералов, обеспечивающих высокий уровень извлечения полезных компонентов и качества получаемых концентратов, является важной научной и практической задачей, которую предстоит решать в перспективе.

Геолого-технологическое изучение индустриальных минералов Карелии*

К важнейшим факторам, влияющим на особенности минералогии и геохимии конкретных месторождений, относятся генетические особенности, фациальная принадлежность и термодинамические условия метаморфизма. Особенности вещественного состава индустриальных минералов вызывают колебания показателей обогащения, накладывают значительный отпечаток на технологию обогащения и определяют перспективы их использования.

Большинство перечисленных индустриальных минералов обогащается по простым, экологически щадящим технологическим схемам с использованием гравитации либо магнитной сепарации с высокой интенсивностью магнитного поля. Все необходимое для обогащения оборудование может быть скомпоновано на передвижной обогатительной установке, обеспечивающей быстрый ввод в эксплуатацию.

Перспективными объектами, в первую очередь, становятся легко доступные месторождения с высоким содержанием извлекаемых индустриальных минералов, стабильные по составу, обогащение которых возможно по простым, экологически щадящим технологическим схемам. Среди таких объектов особое по-

ложение продолжает занимать **керамическое сырье**, традиционно добываемое из пегматитов Карелии, которое вначале подвергается рудоразборке с последующей доводкой магнитной сепарацией. Замена рудоразборки радиометрической сепарацией существенно повышает извлечение микроклина и плагиоклаза, что показано при лабораторных и полевых испытаниях, выполненных совместно с ВИМС на ряде месторождений пегматита южной и северной Карелии (Пекки, Разоренова, 1974; Скамницкая и др., 1988). Однако качество полевошпатовых концентратов из пегматитов по железу в пределах одного месторождения часто непостоянное по содержанию, а сумма щелочей и калиевый модуль изменяются в широких пределах (табл. 1).

Более стабильны по качеству концентраты из магматических пород, к которым относятся геллефлинта (вскрышные породы при отработке магнетитовых кварцитов Костомукшского месторождения), кварцевые порфиры месторождения Роза-Ламби, анортозиты Котозерского массива, сиениты Северного месторождения Елетьозерского массива. По экологически щадящей технологической схеме, с использованием стадийной магнитной сепарации, из кислых вулканитов Карелии получены кварц-полевошпатовые концентраты, содержащие не более 0,2% Fe₂O₃. Исследования, проведенные в «Механобре» на сепараторе «Sala», позволяют снизить содержание железа до 0,1%. Выход концентрата достаточно высок – 70–75%. Необходимость в разделении полевых шпатов отпадает, так как породы в естественном виде имеют натровый (геллефлинта) или калиевый (кварцевые порфиры) состав (Вскрышные породы..., 1983; Скамницкая и др., 1978).

Для нужд стекольной промышленности перспективны крупнозернистые **сиениты** дифференцированной Елетьозерской интрузии, относящейся к формации щелочных габброидов. Из них магнитной сепарацией получены концентраты, содержащие 0,1–0,15% железа, что выгодно отличает их от нефелиновых и щелочных сиенитов Кольского региона, большей частью трудно обогатимых по железу, так как железо входит в кристаллическую решетку фельдшпатоидов.

На участке Котозерский обособляются **анортозитовые породы** с крупно-, среднезернистыми структурами. В контуре анортозитового участка Котозерского массива выделено несколько типов пород: неизменные

* Более подробно вопросы геолого-технологической оценки минерального сырья Карелии изложены в монографии Е. Е. Каменевой и Л. С. Скамницкой «Обогащение минерального сырья Карелии» (2003).

анортозиты, метасоматизированные анортозиты, плагиоклазиты, амфиболизированные анортозиты. Главным породообразующим минералом всех разновидностей является плагиоклаз высокой основности (до 74% An). Свежий плагиоклаз обычно имеет темную окраску, обусловленную пылевидными включениями рудных минералов. При наложенных метасоматических процессах происходит осветление плагиоклаза, сопровождаемое выделением мелких зерен рудных минералов.

На участке преобладают метаанортозиты. Минеральный состав анортозитов простой, двухкомпонентный. Рудообразующим минералом является плагиоклаз, состав которого варьирует от An₅₂ до An₇₄ и количество в породе колеблется от 70 до 95%; основной железосодержащий минерал – амфибол (зеленая роговая обманка). Контрастность по свойствам основных породообразующих минералов предопределяет принципиальную возможность их селективного разделения магнитным и флотационными методами (Щипцов и др., 2004).

В результате оценочных технологических исследований показана принципиальная возможность обогащения анортозитов с получением высококачественного плагиоклазового концентрата по двум вариантам схем (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика концентратов, %

Технология обогащения	Выход	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO
Флота-магнитная	59,0	0,13	4,53	0,29	12,1
Магнитная	49,1	0,21	4,64	0,2	12,3

Анортозиты являются полевошпатовыми породами, которые имеют многоцелевое использование в промышленности, определяемое качеством сырья. Основное направление использования концентратов – производство малощелочных стекол (термостойкие трубы и изоляторы).

Кианит. На качественную оценку кианитовых руд, помимо принадлежности к одному из генетических типов, большое влияние оказывает тип метаморфизма. Кианитовые руды, сформированные в условиях метаморфизма кианитового типа, отличает более чистый характер кианитовой минерализации. Примером служат кианиты Южной линзы месторождения Хизоваара. Из них по флотационной схеме получены наиболее высококачественные кианитовые концентраты (90–92% кианита) при высоком извлечении (Алексеев, 1976). Качество

концентрата, полученного по гравитационной схеме, ниже, но новые перспективы открывает разработанная в «Механобр» технология обогащения в тяжелых средах тонкомолотых руд.

У руд, образованных в других условиях глубинности метаморфизма (участки Восточный, Фукситовый), кианит содержит многочисленные включения минералов, снижающих промышленную ценность кианита (Каменева и др., 2003) (табл. 3).

Изучена возможность улучшения флотационных свойств кианита путем модифицирования поверхности путем оттирки в плотной пульпе и ультразвукового воздействия.

Обновление поверхности минералов оттиркой в плотной пульпе (Т : Ж = 3 : 1, время изменилось от 10 до 30 минут) существенно не улучшило результатов флотации. Доизмельчение руды после флотации сульфидов в течение 5 минут увеличивает потери кианита со шламами, выход которого составил 18,3% против 13,4%.

Наибольшее влияние на флотационные свойства кианита оказывает ультразвуковое воздействие. Обработка ультразвуком проводилась при акустической мощности излучателя 50 Вт/см². Время воздействия и частота подбирались экспериментально. Результаты флотации кианита из руды с предшествующей ультразвуковой обработкой показали, что лучшие показатели достигаются при озвучивании руды в течение 7 минут при частоте 22 кГц. При частоте 44 кГц извлечение кианита повышается на 1,5%, но содержание кианита в концентрате падает. Введение обработки ультразвуком перед обесшламливанием нивелирует различия в состоянии поверхности зерен кианита, что позволяет довести содержание кианита в концентрате до 94–95% (рис. 1). Извлечение кианита в концентрате увеличивается на 4–7%.

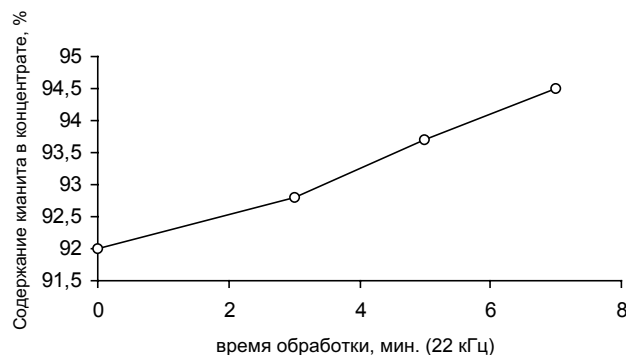


Рис. 1. Изменение качества кианитового концентрата при ультразвуковой обработке

Таблица 3. Результаты обогащения кианитовых руд Хизоваарского месторождения, % по массе

Тип руды	Содержание в исходном Al ₂ O ₃	Характеристика концентрата		
		Выход	Содержание Al ₂ O ₃	Извлечение Al ₂ O ₃
Метаморфический	24,02	9,92	53,05	21,91
Метаморфогенно-метасоматический	9,00–28,84	12,50–38,96	12,38–56,69	16,34–76,97
Метасоматический	14,96–22,23	11,50–29,54	26,10–57,40	18,70–72,09

Графит в Карелии широко распространен и отличается по структуре и технологии обогащения. Обогащаемость графитовых руд определяется минеральным составом и структурными элементами: размерами и формой графитовых чешуй и типами сростаний графита с породообразующими минералами. Наибольший интерес представляют графитовые руды месторождения Ихала. При геолого-технологическом изучении здесь выделено несколько генетических и технологических типов руд.

Обогащение проводилось методом флотации с доизмельчением пенного продукта и тремя-пятью перечистками. Установлено, что неизменные биотитовые гнейсы, мигматиты, щелочные метасоматиты характеризуются легкой обогащаемостью. Сростки графита представлены параллельными сростаниями с биотитом. Содержание углерода в концентратах составляет 90–95% при извлечении 92–97%. В метасоматитах крупночешуйчатый графит образует сростки с амфиболом и пироксеном, а мелкочешуйчатый с размером чешуй 0,03–0,3 мм находится в тесном сростании с полевыми шпатами.

Более сложные и разнообразные по составу и типам сростаний сростки графит образует в диафторированных биотитовых гнейсах. Преобладают трудно раскрываемые сростки с пирротинном и сложные сростки с биотитом и полевыми шпатами, биотитом и кварцем. Графитовые руды из зон диафтореза характеризуются низкими технологическими показателями (табл. 4).

Гранат относится к минералу преимущественно метаморфического происхождения, образование которого связано с условиями как регионального, так и контактового метаморфизма. В природе особенно распространены гранаты пироп-альмандинового ряда, что определяет их как высокотемпературные образования. В этом отношении очень показательным является территория Северной Карелии (Бело-

морский подвижный пояс и гранит-зеленокаменные области). Именно в данных структурных областях парагенетические типы породообразующих гранатов относятся к таким типам метаморфических пород, как кианитовые эклогиты, жедритовые породы, гранат-биотитовые гнейсы, гранат-ставролитовые гнейсо-сланцы, гранатовые амфиболиты, гранат-амфиболовые гнейсы, гранат-кианит-мусковитовые или гранат-серицитовые сланцы (кварцитоподобные породы) (Щипцов и др., 2002б).

Исследования обогащаемости различных по составу гранатсодержащих руд показывают, что гранатовая руда представляет промышленный интерес, если вкрапления граната достаточно крупны и не содержат вростков других минералов. Легкой обогащаемостью характеризуется руда, если гранат находится в ассоциации с полевыми шпатами и кианитом, которые представляют самостоятельную ценность. Примером является месторождение Тербеостров, где присутствие амфибола в руде резко снижает обогащаемость и качество гранатового концентрата (табл. 5).

Гранат-ставролитовые гнейсо-сланцы, гранатовые амфиболиты, гранат-амфиболовые гнейсы месторождений Уни-Ярви, Левин Бор, Высота, Западно-Плотинское отличаются трудной обогащаемостью, что связано с неблагоприятными текстурно-структурными особенностями и наличием ассоциаций минералов с близкими физическими свойствами, нарушающими процесс разделения.

Трудная обогащаемость руд Уни-Ярви обусловлена весьма тонкой вкрапленностью минералов-примесей в зернах граната, в рудах месторождения Левин Бор она связана с присутствием амфибола и ставролита – минералов, обладающих близкими с гранатом магнитными, флотационными и гравитационными свойствами. Гранатсодержащая руда на месторождении Высота 181 представлена тремя промышленными типами, отличающимися по минеральному составу и

Таблица 4. Ожидаемые показатели обогащения графитовых руд различных природных типов

Тип руды	Особенности технологической схемы			Характеристика концентрата			
	Тонина измельчения перед основной флотацией	Количество перечистных операций	Количество операций доизмельчения	Степень раскрытия сростков графита	Содержание углерода	Извлечение углерода	
Биотитовые гнейсы	Неизменные	50–60% кл. – 0,07 мм	3–5	1	75–80	92,43	91,57
	Диафторированные	То же	5	2	65–70	90,51	87,58
Мигматиты	"	"	3–5	1	75–78	95,0	94,58
Щелочные метасоматиты	"	"	3–5	1	70–75	86,65	94,23

Таблица 5. Показатели обогащения кианитовых эклогитов, жедритовых пород месторождения Тербеостров, % по массе

Продукты	Гранатсодержащие гнейсы			Амфиболиты		
	Выход	Содержание граната	Извлечение граната	Выход	Содержание граната	Извлечение граната
Гранатовый концентрат	29,57	92,50	83,01	40,61	675,82	93,44

текстурно-структурным особенностям (гранат-кианит-ставролитовый сланец, гранат-кианит-слюдистый сланец, гранатовый амфиболит). С точки зрения обогащения процесс гранат-ставролитовый минеральный комплекс, как и гранат-амфиболовый, является неразделяемым.

Высокотемпературный обжиг исходных проб руды месторождения Левин Бор показал, что при нагреве до 700 °С увеличивается магнитная восприимчивость как граната, так и амфибола. В результате отмечается увеличение выхода концентрата в процессе магнитной сепарации, но увеличения селективности процесса разделения этих минералов не происходит. Амфибол и ставролит удаляются лишь частично, в основном в отдельных классах крупности. Учитывая, что эти минералы близки по большинству характеристик к гранату и также обладают абразивными свойствами, целесообразно получение коллективных концентратов – гранат-ставролитового и гранат-амфиболового. В этом случае основной задачей обогащения является удаление примесных минералов (кварца, плагиоклаза, слюды, кианита, рутила и других). Характеристика гранатовых концентратов из труднообогатимых руд приведена в табл. 6.

Ильменитовая минерализация в Карелии отмечается в Еletzозерском габбро-щелочном комплексе, на Тикшеозерском месторождении апатит-ильменит-титаномагнетитовых руд (Вос-

точный участок), а также на рудопроявлениях Шилос и Хапунваара. К **титаномагнетитовому типу** относится Пудожгорское месторождение, а также Велимякское и Койкарское рудопроявления. Руды Ведлозерской площади – **ильменит-магнетитовые**.

Сравнительная характеристика перспективных месторождений и проявлений титаносодержащих руд Карелии и Кольского полуострова приведена в табл. 7.

Перечисленные типы титаносодержащих руд могут представлять промышленную ценность (Каменева, Скамницкая, 2003б).

Пудожгорское месторождение титаномагнетитовых руд приурочено к кряжу коренных пород, сложенному габбро-диабазами и вытянутому в северо-западном направлении на расстояние 7,1 км. Кряж состоит из трех обособленных возвышенностей – Дивгора, Патгора и Мурьев Кряж, разделенных между собой неглубокими заболоченными лощинами. Титаномагнетитовые руды представляют собой габбро-диабазы и диабазы, содержащие густую вкрапленность титаномагнетита в количестве от 20 до 75%. К рудам I разности отнесены габбро-диабазы, содержащие от 40 до 75% вкрапленников титаномагнетита, к рудам II разности – габбро-диабазы, содержащие вкрапленники титаномагнетита в количестве от 25 до 40%. Технология обогащения, разрабатываемая с 1934 г. в различных организациях, показывает, что магнитное обогащение обеспечивает получение

Таблица 6. Характеристика гранатовых концентратов из труднообогатимых руд, %

Месторождение	Тип руды	Концентрат	Технологические показатели обогащения		
			Выход	Содержание граната	Извлечение граната
Западно-Плотинское	Гранат-ставролитовые сланцы	Гранат-ставролитовый	13,38	68,04	65,68
		Ставролит-гранатовый	8,95	38,8	25,5
		Исходная руда	100	13,86	100
Левин Бор	Гранатсодержащий амфиболит	Гранатовый 0,5–0,25 мм	3,11	60,8	11,82
		Гранатовый 0,25–0,1 мм	2,9	63,5	11,33
		Исходная руда	100	16	100
Высота 181	Гранатсодержащий метасоматит	Гранатовый из сланцев	18,92	93,4	1,05
		Гранатовый 0,5–0,25 мм из амфиболитов	3,11	60,8	11,82
		Гранатовый 0,25–0,1 мм из амфиболитов	2,9	62,5	11,33
		Исходная руда	100	15	100
Уни-Ярви	Гранат-биотитовый гнейс	Гранатовый	9,95	97,35	91,38
		Исходная руда	100	10,6	100

Таблица 7. Характеристика некоторых месторождений и проявлений титаносодержащих руд

Месторождение	Тип руды	Основные промышленные минералы	Среднее содержание, %			Запасы руды, млн т
			Fe _{общ}	TiO ₂	V ₂ O ₅	
Пудожгорское	Титаномагнетитовый	Титаномагнетит; полезные компоненты – железо, золото, ванадий, кобальт, медь, ЭПГ	27,8	8,14	0,43	316,7
Суриваара	Титаномагнетит-ильменитовый	Ильменит				182,3
Ведлозерское	Ильменит-магнетитовый	Ванадийсодержащий магнетит, ильменит	32,0	10,0	0,45	

железо-титан-ванадиевого концентрата, содержащего 47,0–55,1% Fe, 12,7–18,1% TiO_2 и 0,6–1,2% V_2O_5 . Уровень технологического извлечения составил 32,4–67,6% Fe, 48,2–85,2% TiO_2 и 40,0–81,7% V_2O_5 . Титаномагнетитовые руды представляют собой единый технологический тип, который может перерабатываться по единой схеме. Основным рудный минерал – титаномагнетит – выделяется в зернах размером 1,0–1,5 мм, что обуславливает возможность его селективного выделения магнитным методом. Так как ильменит развит в виде трех генераций, теоретически может быть выделена только та часть ильменита, которая находится в свободном виде, но, с учетом невысокого содержания, его извлечение в самостоятельный концентрат экономически нецелесообразно.

На Елетьозерском массиве наиболее перспективным является рудный участок Суриваара, где были опробованы и оценены несколько минерализованных залежей с титансодержащим магнетитом и ильменитом. По содержанию диоксида титана руды подразделяются на три сорта: 1 сорт – выше 12% TiO_2 , 2 сорт – 8–12% TiO_2 , 3 сорт – 5–8% TiO_2 . Технологически изучению подверглись в основном руды 1 сорта, обогащение проводилось по схеме, включающей дробление, измельчение, магнитную сепарацию в слабом поле для выделения магнетита с последующей концентрацией на столе для выделения ильменита. При доводке промежуточного продукта применялась сепарация в сильном поле и флотация ильменита. Качественный состав ильменитового концентрата, полученного из разных типов руды, невыдержанный по составу. Содержание TiO_2 в концентратах составляет 41–45%, что в значительной степени связано с изменением состава силикатной части пород. В 1994 г. дополнительно изучена залежь, на которой рудная минерализация приурочена к трем типам пород, – амфиболитизированным пироксенитам (амфиболитам), оливиновым габбро и крупнозернистым габбро, мощность которых варьирует от десяти до нескольких десятков метров.

Изучение вещественного состава и текстурно-структурных особенностей руды показало, что ильменит представлен тремя генерациями: таблитчатыми зернами неправильной формы, тонкими пластинами и эмульсионной вкрапленностью в зернах магнетита. Наиболее часты срастания таблитчатых зерен ильменита с титаномагнетитом размером 0,45 × 0,6 мм, 0,7 × 0,35 мм, редко 4,0–1,3 мм. Более мелкие кристаллы ильменита размером 0,045 × 0,03 мм, 0,001 × 0,002 мм развиты вдоль контуров гнезд титаномагнетита и по трещинам в титаномагнетите, а также скоплений вдоль поздних трещин (тип мозаичного кварца) размером 0,07 × 0,7 мм, 0,027 × 0,027 мм и т. д.

Титаномагнетит образует изометричные выделения, представленные тонкорешетчатой структурой распада, в которых присутствуют

единичные пластинки ильменита толщиной 10–20 мкм. Исследования по обогащению ильменитовых руд месторождения Суриваара показали, что обогатимость руд определяется их структурными особенностями (табл. 8).

Таблица 8. Структурные особенности руд по технологическим пробам

Тип руд	Границы преобладающего размера вкраплений ильменита, мм	Кол-во проанализированных проб, %
Крупновкрапленные	Более 1,5	12,5
Мелковкрапленные	1,5–0,2	62,5
Тонковкрапленные	0,2–0,02	25

При измельчении крупно- и мелковкрапленных руд включений ильменита зерна ильменита легко освобождаются от сростков с другими породообразующими минералами. Мелковкрапленные руды характеризуются тесным взаимным прорастанием минералов, что обуславливает трудную раскрываемость зерен ильменита.

Степень обогащения легкообогатимых руд в первичной стадии достигает 10. Селективность разделения труднообогатимых руд очень низкая. Степень их обогащения механическими методами не превышает 1,5. Наиболее стабильна по составу и технологическим параметрам зона оливиновых габбро мощностью 60 м (разведочный профиль 36) со средним содержанием TiO_2 9,93%. Из отобранных здесь проб 87,5% обладают устойчивыми показателями обогащения. Проведенные исследования ильменитовых руд не снимают с повестки практической значимость выявленных еще в 50-е годы рудных залежей Суриваара, а наоборот, в силу возможного комплексного использования свидетельствуют об актуальности дополнительного геолого-технологического изучения.

Руды Ведлозерской площади неоднородны, представлены различными типами, отличающимися по минеральному составу и текстурно-структурным особенностям. Текстура породы – от вкрапленной у ильменитовой разновидности руды до неявно выраженной полосчатой со следами пострудных деформаций либо прожилковая, массивная у магнетит-ильменитовой руды.

Содержание магнетита в руде в зависимости от типа колеблется в пределах 18,95–39,1%, ильменита – 17,5–20,4%. Минералы-примеси представлены амфиболом, плагиоклазом, слюдами (флогопит, хлорит). В меньших количествах в пробах присутствуют сульфиды (халькопирит), содержание которых составляет 0,22–0,3%. Сульфидизированная разновидность содержит до 1,8% сульфидных минералов. Многообразие форм рудных минералов в рудах предопределяет различия в обогатимости по типам руды. Преобладают труднообогатимые руды.

Возможность выделения двух минеральных концентратов – ильменитового и железованадиевого – изучена на легкообогатимых рудах. В процессе технологических исследований испытаны различные варианты технологической схемы: магнитная, магнито-гравитационная и магнито-флотационная. При обогащении по магнито-флотационной схеме получены магнетитовые концентраты, содержащие 66,0–67,2% Fe_{общ.}, при извлечении 42,4–74,4% Fe_{общ.}. Содержание пентоксида ванадия в магнетитовых концентратах составляет 0,77–0,98%. Выделенные в результате флотации ильменитовые концентраты содержат 43,1–50,7% TiO₂. Для получения кондиционного ильменитового концентрата из сульфидизированной разновидности руды необходима дополнительная операция сульфидной флотации. В противном случае концентрат содержит заметную примесь сульфидов. Флотация сульфидов из черновых ильменитовых концентратов протекает достаточно селективно и позволяет извлечь до 90–98% сульфидных минералов, в результате чего качество ильменитового концентрата повышается до 42–44% по диоксиду титана.

Сравнительные технологические показатели обогащения титансодержащих руд Карелии приведены в табл. 9.

На примерах промышленных минералов прослеживается картина современных тенденций развития техники. С развитием высоких технологий все более актуальными становятся минеральные продукты высокой чистоты, а это в свою очередь влечет за собой интерес к таким промышленным минералам, которые не играли значительной роли в недалеком прошлом.

Новые направления исследований Института геологии в области переработки минерального сырья

В 2003 г. в Петрозаводске состоялась Международная конференция «Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых» (Направленное изменение..., 2003). Не случайно в решении этой конференции отмечено

на чрезвычайно большая роль развития новых методов в условиях Карельского региона, весьма чувствительного к воздействию на окружающую природу со стороны функционирующих горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий, перспективно-планируемых и прогнозируемых.

В настоящее время в Институте геологии проводятся систематические технологические исследования руд промышленных минералов. В соответствии с разработанной методологией проводятся теоретические и практические исследования, включающие:

- изучение взаимосвязи геолого-минералогических особенностей и технологических свойств руд промышленных минералов;

- исследование механизмов изменения свойств минералов при направленном воздействии;

- разработку технологических схем обогащения руд, содержащих промышленные минералы, с учетом комплексности использования сырья и экологических факторов.

Трудности при обогащении обусловлены:

- микровключениями твердых минеральных фаз, образованных в процессе кристаллизации минерала вследствие распада твердых растворов;

- пленками одного минерала на поверхности другого как следствие окислительных и других вторичных процессов;

- жидкими, газовой-жидкими и газовыми включениями в минералах, являющимися следствием процесса кристаллизации;

- изоморфными примесями в минералах;

- присутствием в руде минералов с близкими свойствами, что затрудняет или делает практически невозможным их селективное разделение.

На конкретных примерах обосновано, что обогащение руд, для которых эти признаки выражены достаточно сильно или сочетаются, по традиционным схемам неэффективно и не обеспечивает получение высоких технологических показателей. Одним из методов повышения эффективности переработки таких руд является направленное энергетическое воздействие на

Таблица 9. Сравнительные результаты обогащения титансодержащих руд

Тип руды	Содержание в пробе, %			Концентрат	Содержание в концентрате, %		
	TiO ₂	Fe _{общ.}	V ₂ O ₅		TiO ₂	Fe _{общ.}	V ₂ O ₅
Титаномагнетит-ильменитовый	5,9–13,4	10,5–16,77	0,05–0,15	Ильменитовый	41,38–45,98		
Титаномагнетитовый	7,05	227,0	00,4	Пудожгорское Железованадиевый	39,5	53,0	0,9
				Ильменитовый			
				Кобальт-пиритно-медный (Co – 1,1%, Cu – 16,7%, S – 30,4%)			
Ильменит-магнетитовый	7,3–10,75	16,8–27,0	0,27–0,38	Ведлозерское Железованадиевый	43,1–50,7	66,0–67,2	0,77–0,98

минералы с целью придания им заданных свойств. Хотя использование различных экспериментальных методов направленного воздействия на изменение свойств минералов приводит к качественно противоречивым результатам, данные исследования развивают теорию обогащения. Авторы выполняли исследования, поддержанные грантом РФФИ 01-05-64230а «Теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей преобразования свойств минералов в условиях воздействия различными силовыми полями».

Теоретические и практические вопросы направленного изменения свойств минералов в последние годы признаны перспективным направлением теории разделения минеральных компонентов. Теоретические основы направленного изменения свойств минералов сформулированы И. Н. Плаксиным, В. И. Ревнивцевым, В. А. Чантурия.

В развитие этого научного направления на примере широкого класса минералов выполнен комплекс исследований по выявлению и научному обоснованию механизмов изменения их свойств под воздействием ультразвука, химически активной плазмы, СВЧ-излучения, мощных электромагнитных импульсов, β -излучения.

Приведем некоторые результаты этих исследований.

1. *Изучена возможность усиления магнитных свойств индустриальных минералов в результате термического воздействия.* Направленное изменение магнитных свойств (магнитной восприимчивости) может быть вызвано термическим (нагревание), ультразвуковым или химическим (обработка щелочью) воздействием.

Сущность изменения магнитной восприимчивости того или иного минерала заключается в том, что магнитные свойства определяются кристаллохимическими особенностями, которые изменяются при изменении структурного состояния или химического состава минерала после термической обработки. В результате высокотемпературного обжига граната, амфибола и ставролита при нагреве до 700 °С возрастает их магнитная восприимчивость, что приводит к резкому возрастанию выхода концентрата при снижении массовой доли минералов-примесей.

2. *Экспериментально исследованы и теоретически обоснованы закономерности преобразования свойств поверхности кианита под воздействием низкотемпературной высокочастотной плазмы.* Проведенными исследованиями обоснована возможность усиления флотационной активности минерала за счет увеличения абсолютного количества активных центров адсорбции при воздействии кальцийсодержащей плазмы.

Изучение структурных изменений и фазовых превращений при плазмохимической активации

указывает на существенную модификацию поверхностного слоя кианита. Методом растровой электронной микроскопии установлено, что на поверхности образцов, обработанных в высокочастотной плазме в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$, проявляются инородные очаговые образования, имеющие размеры от одного до десятков микрон (рис. 2). При более сильном увеличении (10 000 раз) обнаружено, что увеличивается степень дефектности поверхностного слоя, что связано со смещением ионов и появлением дислокаций (рис. 3).

Рентгенограмма модифицированного кианита характерна для поликристаллического образца с сильной текстурой, а на поверхности идентифицируется новая фаза, соответствующая карбонату кальция. По нашему мнению, вновь созданная кальцийсодержащая фаза является дополнительным активным центром адсорбции. Этот вывод подтверждается результатами исследования состава поверхностного слоя методом инфракрасной спектроскопии: на спектре природного кианита фиксируются только полосы поглощения алюминия, на спектре модифицированного кианита появляются полосы поглощения кальция.

Полученные данные согласуются с результатами микрофлотации: при расходе олеата натрия 600 мг/л выход мономинеральной фракции модифицированного кианита составляет 68,7% по сравнению с 42% у кианита с неизменной поверхностью.

3. *Выполнены комплексные исследования по удалению газово-жидких включений (ГЖВ) в минералах.* Актуальность проведения этих исследований связана с тем, что роль ГЖВ в технологическом процессе обогащения практически не изучена. ГЖВ – это природные включения минералообразующих сред, герметически изолированные в минералах эндогенного происхождения. Их состав определяется особенностями геологических процессов, и данные о ГЖВ, как правило, используются для объяснения процессов рудообразования. Подавляющее большинство работ по ГЖВ относится к области минералогической термометрии и барометрии.

По нашей гипотезе, «неизбежные ионы» во флотационной пульпе в значительной мере обусловлены не только растворением минералов, но и жидкими, газово-жидкими и газовыми включениями, которые, вскрываясь в процессе измельчения, переходят в жидкую фазу пульпы. Кроме того, существует мнение, что неоднородность структуры минералов, определяющая их флотационные характеристики, в значительной мере связана с присутствием ГЖВ (Барский, 1984).

ГЖВ исследованы с позиций технологической минералогии: оценен их качественный и количественный состав в основных породообразующих минералах, выявлено влияние ГЖВ на формирование ионного состава флотационной пульпы, изучены особенности их вскрытия

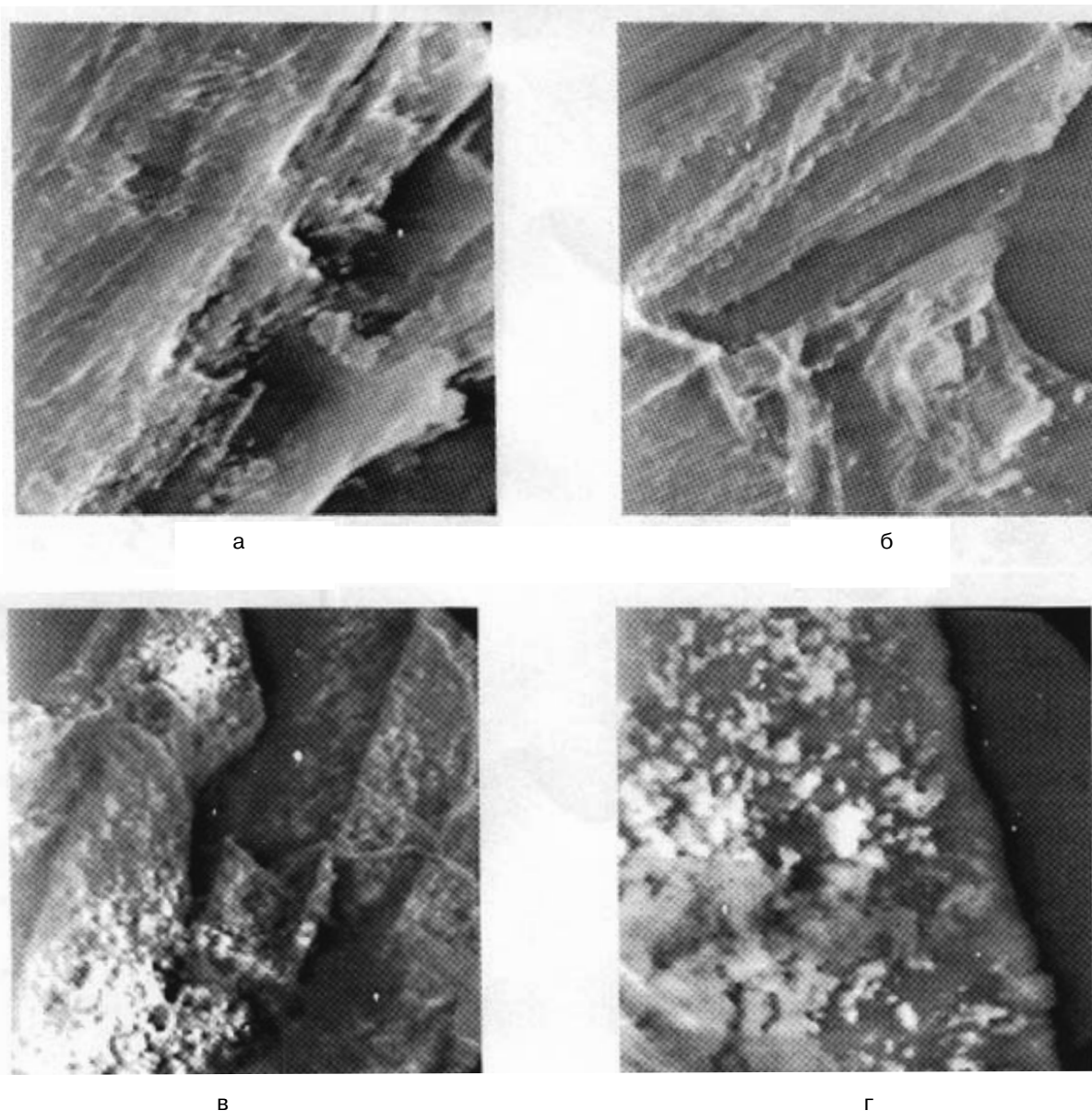


Рис. 2. Рельеф поверхности кианита:

а, б – природный кианит; в, г – кианит после плазменной обработки (увеличение 1100 раз)

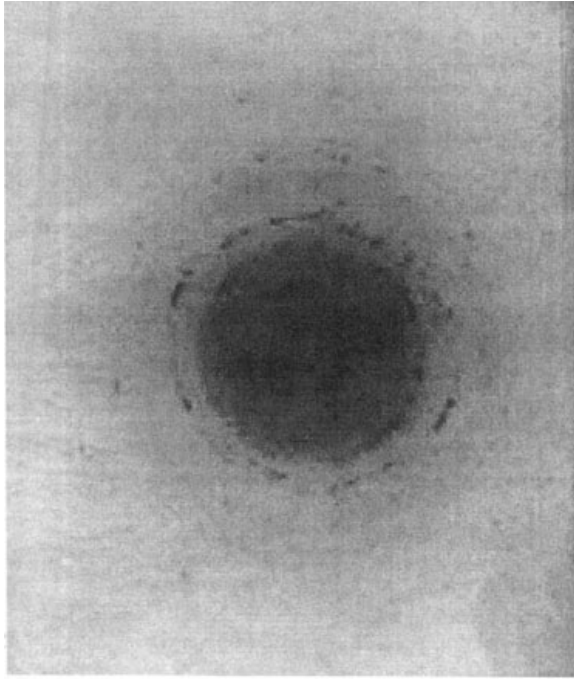
с применением различных физических воздействий.

По данным проведенных минераграфических исследований, ГЖВ присутствуют практически во всех породообразующих минералах: микроклине, плагиоклазе, кварце, турмалине, гранате, кианите и других. Эти включения имеют разные размеры и расположены хаотично либо приурочены к микроскопическим трещинкам и контактам зерен минералов (рис. 4).

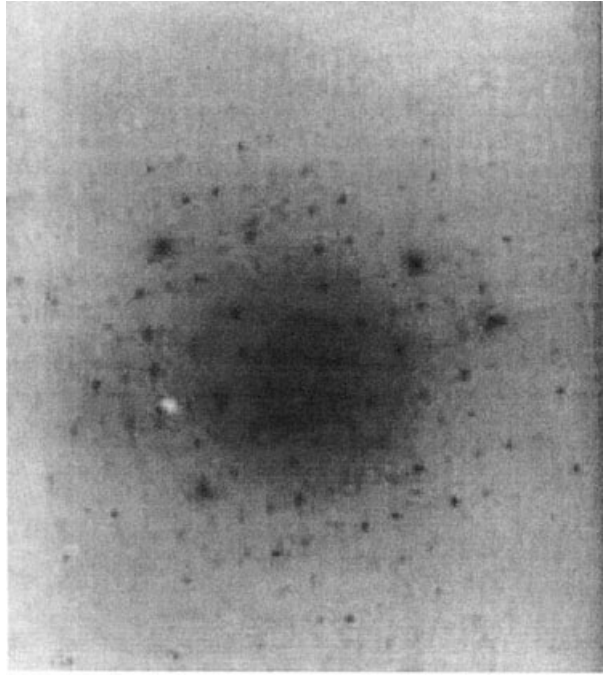
Химический состав ГЖВ в кварце и микроклине определялся на основе химического анализа жидкой фазы, полученной методом вытяжек (Хипаров, 1968). Этот метод с достаточной степенью точности позволяет исследовать растворы жидких, газовой-жидких и газовых включений микроскопических размеров в прозрачных и непрозрачных минералах. Концентрация

ионов в водных вытяжках определялась атомно-адсорбционным, хроматографическим, потенциометрическим и фотоколориметрическим методами.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что водные вытяжки из ГЖВ содержат анионы HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- . Среди катионов присутствуют Fe^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Li^+ . Интересно отметить, что содержание ионов, образованных за счет ГЖВ и растворения минералов, в основном сопоставимы. Концентрация отдельных ионов в растворах из ГЖВ достигает величины, сопоставимой с концентрацией диссоциированных ионов флотореагентов, и априори может значительно влиять на флотацию. В этой связи вскрытие и удаление ГЖВ является одним из факторов, позволяющих интенсифицировать процесс флотации.



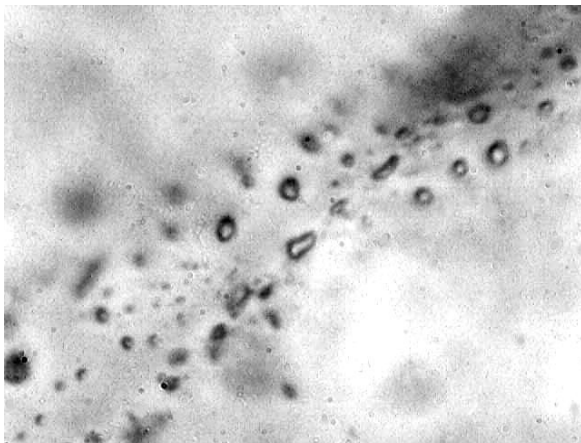
а



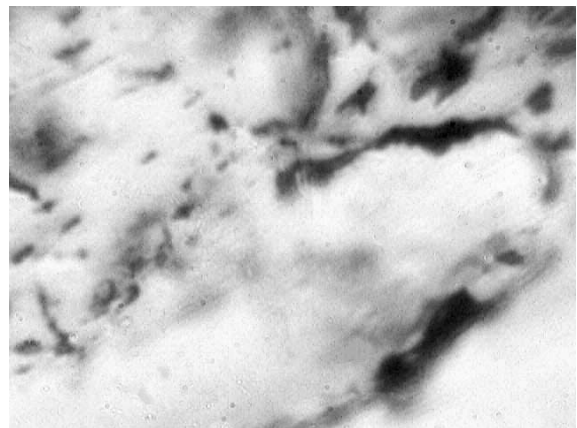
б

Рис. 3. Электронограмма кианита:

а – природного; б – обработанного в плазме (увеличение 10 000 раз)

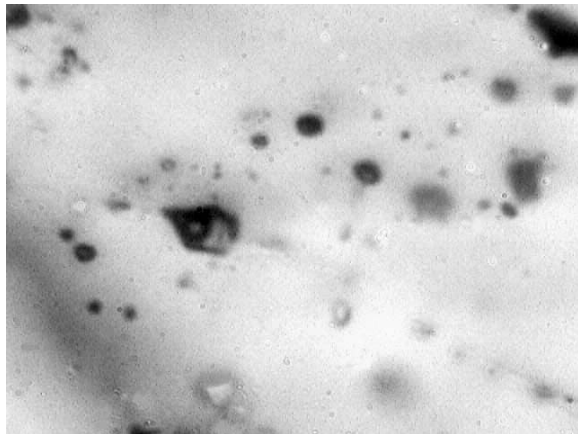


а) Кианит



в) Плаггиоклаз

Рис. 4. Газово-жидкие включения в минералах (фото шлифов)



б) Гранат

Проведенными исследованиями обосновано, что газово-жидкие включения могут быть удалены из минералов термической обработкой, наложением СВЧ-поля, протонным и гамма-облучением, воздействием мощными электромагнитными импульсами. Во всех случаях при направленном воздействии на минералы проявляются характерные черты процесса исчезновения ГЖВ: уменьшение интенсивности пиков декрептограмм, разбиение консолидированных пиков и смещение пиков в низкотемпературную область. Удаление ГЖВ начинается в процессе измельчения, где вскрываются наиболее крупные включения и включения,

развитые на границе зерен минералов. Термообработка при высокой температуре способствует диффузии структурных примесей в поры и трещины, декрепитации ГЖВ. Эксперименты с силикатами свидетельствуют об эффективности СВЧ-обработки для устранения ГЖВ в высокотемпературной области. При воздействии мощными электромагнитными импульсами образуются каналы пробоя и микротрещины, по которым происходит вскрытие ГЖВ. Протонное облучение изменяет температурный спектр декрепитации включений, уменьшает общее количество ГЖВ. Гамма-облучение приводит к снижению количества ГЖВ в микроклине и плагиоклазе, но малоэффективно для кварца.

В зависимости от конкретной технологической задачи, изменения режим обработки, можно достичь либо снижения концентрации вредных (для последующей флотации) ионов в пульпе, либо, вскрывая ГВЖ, получать особо чистые минералы, например, особо чистый кварц. Проведенные исследования мы оцениваем как поисковые, и вопрос влияния ГЖВ на технологические свойства минералов требует дальнейшего теоретического изучения.

Результаты теоретических исследований положены в основу разработки технологических схем обогащения, обеспечивающих селективное разделение минеральных комплексов и получение минеральных концентратов заданного качества при приемлемом уровне извлечения.

Заключение

В результате выполненных исследований на примере основных типов промышленных минералов Фенноскандинавского щита показана роль и значение геолого-минералогических факторов и типоморфных свойств минералов архейско-раннепротерозойского времени в выборе технологии оптимальной переработки от стадии рудоподготовки до цикла обогащения.

При исследованиях технологических руд на стадии геолого-промышленной оценки месторождений, а также при решении практических задач обогащения руд большое значение имеет оценка обогатимости, выполненная с учетом всех альтернативных методов извлечения полезных ископаемых и их комбинирования. В связи с тем что минерально-сырьевая база Карелии в значительной степени представлена объектами с бедными и труднообогатимыми рудами, определяющими являются геолого-минералогические исследования, проводимые с целью изучения взаимосвязи их вещественного состава и технологических свойств. Перспективное направление интенсификации процесса обогащения подобных руд – изменение свойств минералов путем механических, физических, химических и других видов воздействий.

Разработка научных основ эффективных экологически безопасных технологий обогащения перспективных видов минерального сырья Карелии, а также совершенствование ранее предложенных технологических схем извлечения минералов из руд относится к приоритетным направлениям исследований.

Литература

- Алексеев В. С., 1976. Теория и практика обогащения кианитовых руд. Л.: Наука. 200 с.
- Барский Л. А., 1984. Основы минералургии. Теория и технология разделения минералов. М.: Наука. 269 с.
- Вскрышные породы Костомукшского железорудного месторождения и пути их использования в народном хозяйстве, 1983. Петрозаводск: изд-во «Карелия». 142 с.
- Изоитко В. М., 1997. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука. 582 с.
- Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С., 2003а. Обогащение минерального сырья Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 230 с.
- Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С., 2003б. Сравнительная технолого-минералогическая оценка титансодержащих руд Карело-Кольского региона // Геолого-технологические исследования промышленных минералов Фенноскандии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 51–56.
- Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В., Букчина О. В., 2003. Вещественный состав и технологические свойства кианитовых руд Хизоваарского месторождения // Обогащение руд. № 6. С. 17–21.
- Кулмала Т. К., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. и др., 1991. Петрохимия, геохимия и обогащение щелочных сиенитов Елетьозерского массива // Минеральное сырье Лоухского района. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 35–54.
- Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых: Материалы Международ. совещ., 2003 / Ред. акад. В. А. Чантурия. М.: Альтекс. 145 с.
- Новиков Ю. Н., Щипцов В. В., 2004. Экономическое значение минерально-сырьевых ресурсов Республики Карелия // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. № 2. С. 37–42.
- Пекки А. С., Разоренова В. И., 1974. Месторождения полевошпатового сырья Карелии. Л.: Наука. 152 с.
- Скамницкая Л. С., Пекки А. С., Кулмала Т. К., 1978. Вещественный состав и обогатимость высококальциевых кислых вулканитов // Вещественный состав и обогатимость минерального сырья. Л.: Наука. С. 205.
- Хипаров Д. Н., 1968. Некоторые методические вопросы определения химического состава газово-жидких включений в минералах с помощью водных вытяжек // Минералогическая термометрия и барометрия. Т. 2: Новые методы и результаты изучения параметров рудообразования. М.: Наука. С. 76–80.
- Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е., 2005. Теория и практика повышения контрастности смачиваемости минералов // Горный журнал. № 4. С. 59–63.
- Щипцов В. В., 2005. Обзор и оценка промышленных материалов Республики Карелия // Геология рудных месторождений. Т. 47, № 1. С. 3–15.

Щипцов В. В., Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С., 2002а. Взаимосвязь генезиса месторождений, парагенезиса минералов и обогатимости руд // Карелия и РФФИ: Тез. докл. науч. конф., посвящ. 10-летию РФФИ (1–3 окт. 2002 г.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 77–78.

Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Каменева Е. Е., Савицкий А. И., 2002б. Гранатовые руды Северной Карелии, технологические подходы к их освое-

нию и возможные области использования // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 5. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 82–91.

Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. и др., 2004. Геолого-технологическая характеристика крупного проявления анортозитов Котозерского участка (северная Карелия) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 151–162.