

На правах рукописи



Лихникевич Елена Германовна

**ОПЕРЕЖАЮЩИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РУД
РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ – ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ВЫБОРА
ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

Специальность 25.00.05 – Минералогия, кристаллография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»)

Научный консультант: *Ожогина Елена Германовна*
доктор геолого-минералогических наук, зав. минералогического отдела Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М.Федоровского (ФГБУ «ВИМС»)

Официальные оппоненты: *Толстов Александр Васильевич*
доктор геолого-минералогических наук, академик РАЕН, директор Научно-исследовательского геологического предприятия АК «АЛРОСА»
Ткачёв Андрей Владимирович
доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН (ГГМ РАН)

Расс Ирина Теодоровна
доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)

Ведущая организация: *Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ФГБУ ИМГРЭ), г. Москва*

Защита диссертации состоится 3 марта 2021 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.122.02 в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН по адресу: 119017 г. Москва, пер. Старомонетный, 35.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГЕМ РАН <http://igem.ru/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.122.02, к.г.-м.н.
achefra@mail.ru



А.В. Чефранова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Редкие металлы (РМ) и их соединения благодаря уникальным свойствам играют ключевую роль в научно-техническом прогрессе.

Возрастающий спрос на редкие металлы вызван активным ростом использования их в новых высокотехнологичных отраслях: в производстве тепловых элементов ядерных реакторов, батарейных материалах для возобновляемых источников энергии, высоколегированных сталей, спецсплавов для аэрокосмической промышленности и др.

Согласно государственной программе Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (утверждена Постановлением Правительства РФ № 328 от 15.04.2014 г.), к 2020 г. потребление редких металлов в России с учетом потребностей оборонно-промышленного комплекса, по независимым экспертным оценкам, возрастет по основным металлам – ниобию, ванадию, бериллию, литию в среднем в 2 раза. Рост потребления редкоземельных металлов, в связи с развитием высокотехнологичных отраслей, составляет 10% в год.

Сформированный в стране масштабный минерально-сырьевой потенциал редких металлов не реализуется. Россия, занимая по разведанным запасам ведущие места в мире, производит редкометалльно-редкоземельную продукцию только из лопаритовых концентратов Ловозерского ГОКа на ОАО «Соликамский магниевый завод», которая почти полностью поставляется на внешний рынок. При переработке апатит-магнетитовых руд Ковдорского месторождения ОАО «Ковдорский ГОК» попутно извлекается бадделеит (ZrO_2), который почти весь экспортируется, а потребности России в цирконовых концентратах удовлетворяются за счет импорта.

Зависимость промышленности от импорта редких металлов является фактором риска национальной безопасности и развития отечественной промышленности. В связи с этим развитие редкометалльной отрасли в России является актуальной задачей, решение которой обеспечит ликвидацию зависимости промышленности от импорта редких металлов и создание собственного производства высокотехнологической продукции.

Отечественная минерально-сырьевая база редких металлов представлена преимущественно низкокачественными рудами, имеющими полиминеральный состав и сложные текстурно-структурные характеристики. Это сырье обладает непостоянным химическим и минеральным составами, обусловленными присутствием нескольких рудных фаз, отличающихся переменным составом с широким диапазоном изоморфизма; радиоактивностью отдельных минералов; варьирующим гранулярным составом рудных минералов и их сложными морфометрическими характеристиками. Поэтому без глубокого минералогического изучения руд невозможно оценить их качество, обеспечить комплексную переработку, обосновать пути извлечения полезного компонента,

оптимизировать технологический процесс путем направленного изменения свойств руды или минералов.

Особенно актуальными становятся минералого-технологические исследования руд редкометалльных месторождений, промышленное освоение которых в ближайшие годы способно не только полностью удовлетворить потребность отечественной промышленности в редких металлах, но и выйти с разнообразной редкометалльной продукцией на мировой рынок.

Изучением особенностей состава, строения и свойств редкометалльного сырья, их влияния на выбор технологии переработки занимались ведущие ученые геологической отрасли отечественной науки (А.И. Гинзбург, В.И. Кузьмин, А.В. Толстов, Г.А. Сидоренко, И.Т. Александрова, Н.В. Петрова, А.В. Лапин, Е.Г. Ожогина и многие другие).

Цель работы – решение проблемы опережающих минералогических исследований состава, строения редкометалльных руд разного генезиса для прогнозирования их поведения в технологических процессах и выбора оптимальных технологий передела.

Идея работы заключается в определении прогнозных минералогических критериев выбора технологии переработки редкометалльных руд.

Основные задачи работы:

- установить минералого-технологические особенности редкометалльных руд,
- выявить вариации минерального состава редкометалльных руд месторождений разных генетических типов и их влияние на технологические свойства сырья,
- определить минералогические критерии переработки редкометалльных руд,
- разработать фундаментальные основы технологических схем переработки редкометалльных руд, обеспечивающие получение товарной продукции широкого ассортимента и требуемого промышленностью качества.

Методы исследования. Работа выполнялась комплексом методов минералогического анализа и технологических исследований в соответствии с методическими документами Научных советов по методам минералогических и технологических исследований (НСОММИ и НСОМТИ). Виды и последовательность минералогических методов определялись природными особенностями руд и конкретными задачами. Полученные результаты использовались при выборе оптимальных технологических решений, обеспечивающих получение продукции широкого ассортимента при переработке редкометалльных руд.

Экспериментально выбран оптимальный комплекс методов исследования, позволяющий получить необходимую и достаточную информацию о рудах и продуктах их обогащения, включающий методы оптической и электронной микроскопии, рентгенографический, рентгенотомографический и микрорентгеноспектральный анализы.

Минераграфический и оптико-петрографический методы (поляризационные микроскопы Leica DM RX, Германия и Olimpus 51X, Япония) позволили определять текстурно-структурные особенности руд, в том числе характер взаимоотношения минералов, их гранулярный состав, минеральные ассоциации. Однако высокая дисперсность руд, нередко сложный полиминеральный состав в значительной степени затрудняют их исследования оптическими методами. Поэтому ведущим методом количественного минералогического анализа, особенно продуктов передела, являлся рентгенографический фазовый анализ (рентгеновский дифрактометр X`Pert PRO MPD, Нидерланды). В отдельных случаях, например, при изучении руд Томторского месторождения, использовался рентгенотомографический метод (промышленный рентгеновский микротомограф ВТ-50-1 Геотом, Россия) для морфоструктурного анализа рудных минералов и изучения их пространственного распределения в руде. Электронно-микроскопические исследования (растровый электронный микроскоп с энергодисперсионной приставкой Tesla 301В (Словакия) и просвечивающий электронный микроскоп Теснаі 12В (Нидерланды) проводились с целью изучения тонкодисперсных полиминеральных систем и особенностей рудных минералов. Реальный состав рудных минералов и минеральных агрегатов определялся микрорентгеноспектральным анализом (электронно-зондовый микроанализатор JXA-8100, Япония).

Научная новизна:

- с помощью приемов и методов технологической минералогии получены новые данные по особенностям минерального состава редкометалльных, в том числе редкоземельных руд (изоморфизм полезных минералов, микростроение главных рудных минералов, характер их сростаний), обусловленные их генезисом, влияющие на их технологические свойства (качество получаемых продуктов),

- впервые установлены минералогические критерии (переменный гранулярный состав, варьирующий химический состав, одновременное присутствие минералов различных ассоциаций) выбора технологий переработки руд редких металлов ниобиевой и ниобий-редкоземельной специализации,

- разработаны методические основы (принципы) минералогического обоснования необходимости применения гидро-пирометаллургических технологий при переработке редкометалльного сырья.

Защищаемые положения:

1. На основании детальных исследований определены минералогические критерии выбора технологий переработки редкометалльных (ниобий-редкоземельных) руд:

- гранулярный состав с высокой долей тонкодисперсного материала, сформированного минеральными индивидами и агрегатами, тесно ассоциирующими между собой;

- особенности минерального состава, обусловленные одновременным присутствием нескольких полезных минералов разных парагенезисов;

- химический состав как рудных, так и породообразующих минералов, вызванный широкими изоморфными замещениями атомов химических элементов в кристаллической структуре минералов.

2. Установленное преобладание фосфорсодержащих минералов (монацит и минералы группы крандаллита) над пирохлором позволило в начале процесса селективно отделить ниобий от редкоземельных элементов и впервые разработать технологию комплексной переработки пирохлор-монацит-крандаллитовых руд Томторского месторождения, обеспечивающую получение товарной продукции (Nb_2O_5 , оксиды REE, Sc_2O_3).

3. Выявлены закономерности соотношения главных рудных – пирохлора, монацита и нерудных минералов с оксидами, гидроксидами железа и марганца как фундаментальная основа технологии переработки комплексных руд Чуктуконского месторождения – нового масштабного источника получения редких металлов.

4. Определены особенности минерального состава трудноскрываемых циркон-бадделеитовых концентратов обогащения руд Алгаминского рудного поля, распределение новообразованных фаз в продуктах передела, установлена степень концентрирования ценных компонентов в нерастворимом остатке, что позволило создать новую термохимическую (пиро-гидрометаллургическую) технологию их переработки, обеспечивающую получение диоксида циркония, товарных соединений вольфрама и уранового химконцентрата.

Фактический материал. Работа выполнена во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС). Она отражает результаты 35-летних исследований автора по технологической минералогии и металлургическому переделу редкометалльных руд отечественных месторождений. В 2014-2016 гг. в рамках госбюджетной темы института (Государственный контракт № 200/14-Я «Проведение геолого-технологического картирования, разработка принципиальной схемы переработки природных типов руд с получением товарной продукции и разработка ТЭО временных разведочных кондиций на участки Северный и Южный Томторского рудного поля»), а также ряда договорных тем проводилось изучение монацит-пирохлор-крандаллитовых руд для технико-экономического обоснования (ТЭО) временных разведочных кондиций и постановки запасов на государственный учет. В это же время осуществлялись научно-исследовательские работы по изучению особенностей вещественного состава и разработки технологии переработки комплексных руд Чуктуконского рудного поля (Государственный контракт № 44/2014-ЮЛ «Проведение геолого-технологического картирования и разработка принципиальной схемы переработки природных типов руд Чуктуконского рудного поля с получением товарной продукции») для постановки запасов на государственный учет и Алгаминского рудопроявления (Договор-подряда № 57/14 с ФГУП «ИМГРЭ» «Гидрометаллургический передел концентратов обогащения Алгаминского рудопроявления» в рамках Государственного контракта № 5-2014 от 15.02.14 г. на выполнение работ по объекту «Поисковые работы на Алгаминском рудопроявлении циркония с выделением рудных

участков благоприятных для получения товарных циркон-бадделейтовых концентратов (Хабаровский край)), в которых автор принимал непосредственное участие.

При разработке технологических схем переработки редкометалльных руд были проведены сотни опытов, в ходе которых варьировали основные технологические параметры и оценивали распределение ценных компонентов по продуктам передела (кеки от вскрытия, растворы).

В процессе исследований были использованы минераграфические и петрографические описания более сотни прозрачных и полированных шлифов (д.г.-м.н. Кузьмин В.И., к.г.-м.н. Астахова Ю.М.), данные нескольких сотен рентгенографических анализов исходных проб руд, продуктов обогащения, кеков от вскрытия (Шувалова Ю.Н.), более десяти рентгенотомографических анализов (д.т.н. Якушина О.А), а также их химических и спектральных анализов (Вахонин Н.С., Карепов Б.Г.). Для получения более полной информации об особенностях рудообразующих минералов, влияющих на поведение руд в металлургических процессах, проводились электронно-микроскопические (д.г.-м.н. Дубинчук В.Т. и микрорентгеноспектральные (к.г.-м.н. Быстров И.Г.) исследования.

За открытие и разведку Большетагнинского месторождения ниобиевых руд в Иркутской области автор награжден нагрудным знаком «Первооткрыватель месторождения».

Достоверность

Достоверность исследований подтверждается выполнением минералогических анализов на поверенном в РосТесте оборудовании в соответствии с отраслевыми методическими документами Научного совета по методам минералогических исследований, обеспечивающих единство и требуемую точность определений, воспроизводимость результатов исследования, разработку научно обоснованных технологий передела редкометалльных руд, имеющих промышленное значение.

Практическая значимость. Минералогическая информация об исходных редкометалльных рудах и продуктах их химико-металлургической переработки, включая диагностику и количественную оценку всех минеральных фаз, форм нахождения полезного компонента в продукте, позволяет прогнозировать создание технологии извлечения полезных компонентов, а также технологические показатели переработки руд.

Выявлены особенности состава и строения руд, разработаны технологии комплексной переработки редкометалльных руд Томторского, Чуктуконского месторождений, Алгаминского рудопроявления, в основу которых положена минералогическая информация.

Разработаны и внедрены в практику лабораторных работ методические документы по методам переработки редкометалльных руд, которые повышают достоверность лабораторных исследований.

Разработаны и утверждены НСОМТИ методические рекомендации «Автоклавное выщелачивание руд и продуктов их обогащения в лабораторных условиях» (2007 г.); «Переработка редкометалльно-редкоземельных руд и

концентратов с использованием гидрометаллургических методов: предварительной активации (механохимической, свч, ультразвуковой, термической), выщелачивания (агитационного, автоклавного), сульфатизации (жидкофазной, твердофазной)» (2016 г.).

Апробация

Основные результаты и положения диссертации обсуждались и докладывались на международных, всероссийских и региональных конференциях, в том числе на Международных совещаниях «Неделя горняка»: Москва, 2006-2007 гг.; «Плаксинские чтения»: Красноярск, 2006 г., Новосибирск, 2009 г., Казань, 2010 г., Верхняя Пышма, 2011 г., Петрозаводск, 2012 г., Томск, 2013 г., Алматы, 2014 г., Санкт-Петербург, 2016 г., Красноярск, 2017 г., Иркутск, 2019 г.; Всесоюзная конференция – Роль технологической минералогии в расширении сырьевой базы СССР (Челябинск, 1986 г.); III Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 1997 г.); Международный симпозиум «Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке» (Москва, 1998 г.); IV Международный минералогический семинар «Теория, история, философия и практика минералогии» (Сыктывкар, Республика Коми, 2006 г.); Международная конференция «Комплексная переработка нетрадиционного титано-редкометалльного и алюмосиликатного сырья: современное состояние и перспективы» (Апатиты, 2006 г.); Международная конференция «Минерально-сырьевая база черных, легирующих и цветной металлов России и стран СНГ: проблемы и пути развития» (Москва, 2007 г.); Выездная сессия научного совета РАН по научным основам химической технологии (Новосибирск, 2009 г.); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Роль геохимии в развитии минерально-сырьевой базы ТПИ. Прогноз, поиски, оценка и инновационные технологии освоения редкометалльных объектов» (Москва, 2016 г.); III минералогический семинар с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2016)» (Сыктывкар, Республика Коми, 2016 г.); Конгресс обогатителей стран СНГ: Москва 2007, 2009, 2017, 2019 г.; XXIX International mineral processing congress (IMPC, 2018) (Moscow, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Интенсификация гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сырья. Технологии и оборудование» (Санкт-Петербург, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы получения и применения РЗМ и РМ»: Москва, 2017 г.; Международная научно-практическая конференция «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов» (Алматы, 2018 г.); Российское совещание с международным участием «Роль технологической минералогии в рациональном недропользовании» (Москва, 2018 г.); III Всероссийская научная конференция с международным участием «Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов» (Апатиты, 2018 г.); Научно-практическая конференция с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных

фундаментальных исследований и НИОКР: ферросплавы» (Екатеринбург, 2018 г.); Всероссийская научная конференция «Роль и место мелко- и среднемасштабных геохимических работ в системе геологического изучения недр» (Москва, 2018 г.); VI Международная научно-техническая конференция «Решение экологических и технологических проблем горного производства на территории России, ближнего и дальнего зарубежья» (Москва, 2019 г.), XIV Международный конгресс по прикладной минералогии (Белгород, 2019 г.).

Публикации

По теме диссертации самостоятельно и в соавторстве опубликовано более 60 работ, 15 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 монографии, методические рекомендации НСОМТИ, а также статьи и тезисы в научных трудах и изданиях ВИМС, ИМГРЭ, ИХТРЭМС, Гинцветмет.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 180 страницах машинописного текста, содержит 67 рис., 20 табл., библиографический список из 192 наименований.

Личный вклад автора состоит в постановке задач и их решений, в непосредственном участии в проведении экспериментальных исследований по разработке технологических схем переработки редкометалльных руд с учетом особенностей их вещественного состава.

Благодарности

Автор глубоко признателен своему учителю, к.т.н. Петровой Н.В., за поддержку и консультации при выполнении диссертационной работы.

Автор выражает искреннюю благодарность за поддержку и методическую помощь научному консультанту, д.г.-м.н. Ожогойной Е.Г.; за полезные советы при обсуждении аспектов и результатов работы д.г.-м.н. Машковцеву Г.А., к.ф.-м.н. Рогожину А.А., д.г.-м.н. Быховскому Л.З., д.г.-м.н. Пирогову Б.И., к.г.-м.н. Котельникову Е.И., к.х.н. Ануфриевой С.И., Отрубянникову Ф.И.

А также признателен за постоянную поддержку и помощь в интерпретации результатов работы д.г.-м.н. Котовой О.Б., д.г.-м.н. Левченко Е.Н.

Автор благодарен сотрудникам технологического и минералогического отделов ВИМС за помощь и проведение научных исследований по теме диссертации. Благодарит сотрудников ВИМСа за высказанные замечания и помощь в работе над диссертацией.

Томторское ниобий-фосфор-редкоземельное месторождение (Республики Саха (Якутия) приурочено к одноименному массиву щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов. По всем породам развиты остаточные коры выветривания (КВ), среди которых выделяется латеритные мощностью до 300 м по рудным фосфатно-редкоземельным карбонатитам, сформированные каолинит-крандаллитовым, сидеритовым, гетитовым и франколитовым горизонтами.

Несмотря на многолетнюю историю изучения Томторского месторождения нет единого мнения о формировании уникальных пироклормонацит-крандаллитовых руд. Поэтому мы принимаем точку зрения, что богатые

руды – «природные концентраты» ниобия, редких земель, скандия, фосфора сформировались в экзогенных озерных условиях. По существу, руды представляют собой залежи, заполняющие впадины на неравномерно «просевшей» коре выветривания карбонатитов, подвергшейся эпигенетическим изменениям («переотложенной»). Считается, что древняя кора выветривания, на которой залегают богатые руды, образовалась в конце девона – раннем карбоне.

Практический интерес имеют руды, представляющие собой каолинит-крандаллитовый (пироклор-монацит-каолинит-крандаллитовый) горизонт (рудный пласт), связанные с переотложенными корами выветривания. Выделено три участка развития переотложенных эпигенетических измененных КВ: Северный, Южный и наиболее перспективный Буранный. Основные полезные компоненты руд – ниобий (пироклор), иттрий, редкие земли (монацит и Zr-ксенотим, минералы группы крандаллита) и скандий (Sc-циркон и Zr-ксенотим).

Чуктуконское месторождение (Красноярский край) приурочено к одноименному куполу Чадобецкого поднятия. В пределах поднятия обособливаются два выступа пород фундамента платформы – Териновский и Чуктуконский, ядра которых сформированы ультраосновными щелочными породами и карбонатитами, представленными кальцитовыми, доломитовыми, редко – сидерит-кальцитовыми разновидностями, содержащими вкрапленность монацита, пироклора и апатита.

Чуктуконское рудное поле связано с латеритной корой выветривания карбонатитов, оконтуренной по бортовому содержанию редкоземельных металлов (REE) в 3 % в редкоземельных рудах и содержанию пентаоксида ниобия – 0,8 % в ниобиевых рудах. Профиль КВ имеет зональное строение: большая его часть сформирована тонкодисперсными охрами железо-марганцевого состава, в которых в значительном количестве присутствуют барит, монацит, минералы группы крандаллита, церианит, Sr-, Ba-, Се-пироклор. Ниобий-редкоземельные рудные тела располагаются в охристой зоне КВ карбонатитов – с ними связано 90-95 % запасов редких металлов.

Основными компонентами являются редкие земли (монацит, церианит, минералы группы крандаллита), ниобий (пироклор), а также железо и марганец (оксиды и гидроксиды железа и марганца).

Алгаминское рудопроявление (Хабаровский край) расположено в восточной части Сибирской платформы в зоне её сочленения с Юдомо-Майским перикратонным прогибом.

Площадь рудопроявления сложена терригенно-карбонатными отложениями вендского возраста, представляющими собой переслаивание мраморизованных и органогенных доломитов, кварцевых песчаников с глауконитом и линзами седиментационных брекчий. Рудовмещающими породами являются горизонты прокварцованных, кавернозных доломитов. Основной гипотезой источника циркония являются эндогенные щелочные породы массива Ингили.

Цирконийсодержащие руды представлены «рыхлыми» и «твердыми» разновидностями. «Твердые» руды представляют собой коренные, слегка

выветренные доломиты и доломитовые мраморы, в которых развиты секущие прожилки и новообразования кварца, кальцита, гетита с минералами циркония (бадделеит, циркон), а также брекчиевые, вкрапленные кварц-доломитовые, кварц-доломит-кальцитовые породы с повышенными и высокими содержаниями циркония. «Рыхлые» руды представляют собой отложения в карстованных полостях доломитовых мраморов.

Основной полезный компонент руды – цирконий, содержание диоксида циркония колеблется от 2 до 12 %.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. На основании детальных исследований определены минералогические критерии выбора технологий переработки редкометалльных (ниобий-редкоземельных) руд:

- гранулярный состав с высокой долей тонкодисперсного материала, сформированного минеральными индивидами и агрегатами, тесно ассоциирующими между собой;

- особенности минерального состава, обусловленные одновременным присутствием нескольких полезных минералов разных парагенезисов;

- химический состав как рудных, так и породообразующих минералов, вызванный широкими изоморфными замещениями атомов химических элементов в кристаллической структуре минералов.

Редкометалльные, в том числе редкоземельные руды, разнообразны по составу, что связано с присутствием в природе большого количества собственных минералов редких металлов и широко развитыми изоморфными вхождениями последних в структуры других минералов. Руды отличаются весьма разнообразным генезисом (магматический, пегматитовый, грейзеновый, скарновый, гидротермальный, метаморфогенный, осадочный, гипергенный).

Редкометалльные руды относятся к наиболее сложным по вещественному составу видам минерального сырья, при исследованиях которого возникают технологические трудности, связанные с особенностями вещественного состава руд месторождений различного генезиса. Руды в большинстве случаев отличаются невысокими содержаниями полезных компонентов и переменным гранулярным составом минералов. Тантал-ниобиевые, редкоземельные фосфатные, карбонатные и силикатные, нередко циркониевые руды обладают радиоактивностью. Поэтому весьма важно грамотно и обосновано выбрать технологию переработки этого вида сырья, учитывая все его минералогические особенности. Литературные данные и многолетний опыт позволили выявить минералогические критерии, определяющие выбор технологий передела для ниобий- и ниобий-редкоземельных руд:

- сложный морфоструктурный состав, переменный гранулярный состав, значительное количество тонкодисперсных, метаколлоидных образований, сформированных минеральными индивидами и агрегатами микро- и

нанометрового размера; фазовая гетерогенность минеральных зерен, обусловленная различными причинами,

- переменный химический состав рудообразующих минералов, вызванный изоморфными замещениями атомов химических элементов в их кристаллической структуре,

- полиминеральный состав, связанный с одновременным присутствием минералов разных ассоциаций.

Морфоструктурный состав. Гранулярный состав полезных минералов и их морфометрические характеристики обуславливают тип сростания минералов, являющийся главным фактором, определяющим их раскрываемость в руде и в продуктах ее обогащения, т.е. обогатимость руд.

В большинстве своем руды ниобиевой, ниобий-редкоземельной специализации относятся к категории мелко-тонковкрапленных, нередко в них присутствуют тонкодисперсные системы полиминерального состава. Для руд типичен весьма сложный текстурный рисунок, обусловленный пространственным распределением минеральных агрегатов и развитием вторичных текстур.

Гетерогенность гранулярного состава отмечается в ниобий-редкоземельных рудах Томторского месторождения, сформированных несколькими полезными минералами: пироксеном, монацитом, ксенотимом и минералами группы крандаллита. Гранулярный состав этих минералов достаточно разнообразный, разнообразны и взаимоотношения минералов. Пироксен – главный минерал ниобия представлен кристаллами, обломками размером 0,001-0,5 мм и агрегатами, сформированными зернами размером первые микрометры. Иногда присутствуют зерна размером до 1,5 мм. Еще больше варьирует размер зерен монацита. Наиболее ранний монацит встречается в виде мельчайших включений размером 10-15 мкм в кристаллах пироксена. Реликтовый монацит, унаследованный от латеритных охр, присутствует в виде зерен неправильной формы и агрегатов размером от первых микрометров до 3 мм, нередко корродирован минералами группы крандаллита. Помимо варьирующего гранулярного состава монацита установлено, что нередко сплошные агрегаты монацита в действительности имеют сложное внутреннее строение (рис. 1а). Они сформированы длиннопризматическими кристаллами (размер по длинной оси 10-20 мкм, ширина – десятые доли микрометра), беспорядочно ориентированными в пространстве, иногда приобретающими субпараллельную ориентировку или образующими сферолит.

Нередко такие кристаллы монацита представляют собой полые трубки, поверхность которых осложнена более мелкими разно ориентированными трубками или шиповидными наростами. Монацитовый агрегат представляет собой решетчатое, спутанно-волокнистое, сетчатое или ажурное образование (рис. 1б). Минералы группы крандаллита, преобладающие в этих рудах, представлены тонкодисперсными метакolloидными выделениями, в которых величина минеральных индивидов, по данным электронной микроскопии, обычно не превышает 1 мкм. Очень редко отмечаются зерна размером около 5 мкм.

Гранулярный состав полезных минералов является неблагоприятным для обогащения руд механическими методами. Следует учитывать фазовую неоднородность минералов (распад твердых растворов, сингенетичные включения, зональный рост, многократные акты генерации, частичная перекристаллизация, твердофазовые вторичные преобразования и т.д.), а также дефектность зерен и агрегатов (трещиноватость, блочность, отдельность, пористость и пр.). Например, для пирохлора Томторского месторождения типично и зональное строение, и дефектность минеральных зерен (рис. 2).

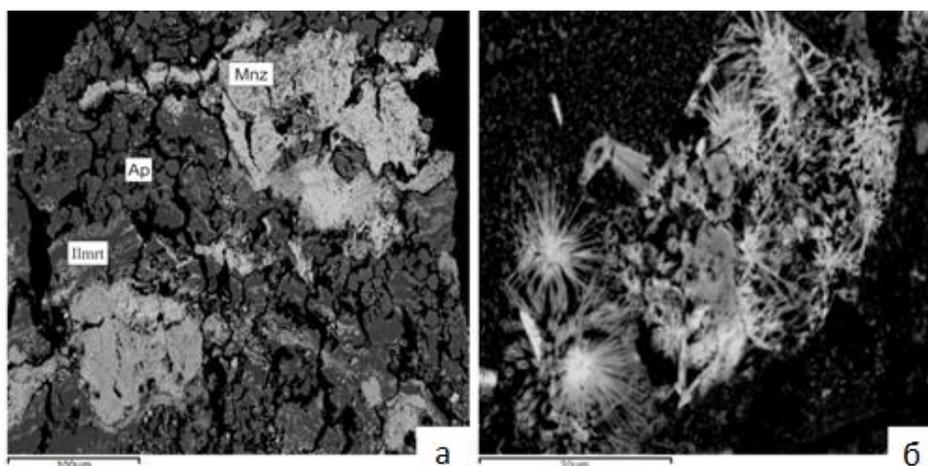


Рис. 1. Формы выделения монацита в руде:
 а – обломки округлой, удлиненно-призматической, реже клиновидной формы;
 б – спутано-волоконистый, скелетный облик зерен.
 а, б – изображения в обратно рассеянных электронах

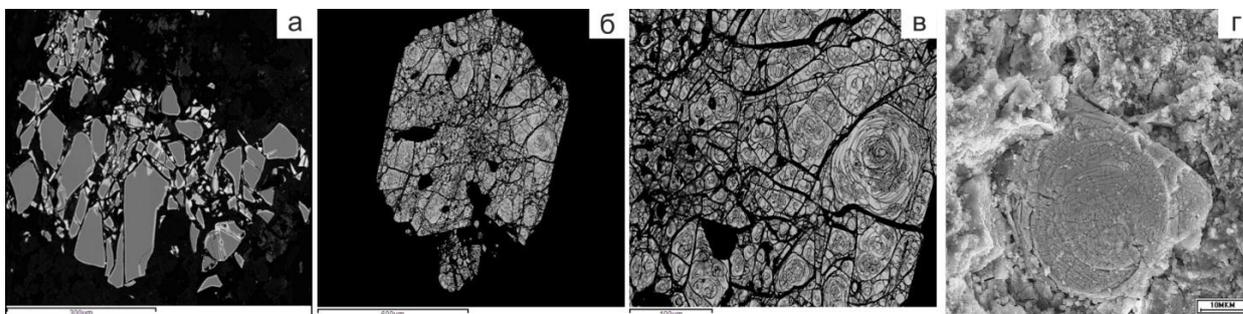


Рис. 2. Внутреннее строение пирохлора: а, б – дезинтеграция крупных кристаллов на мелкие блоки; в, г – скорлуповато-концентрическая отдельность.
 а-в – изображения в обратно рассеянных электронах, г – РЭМ

Химический состав минералов. Типичной особенностью минералов редкометалльных руд является их переменный состав, обусловленный, в первую очередь, изоморфными замещениями атомов химических элементов в кристаллической структуре минералов. Изменчивость состава минералов отмечается не только в рудах месторождений разных промышленных типов, отличающихся условиями образования, но и в рудах однотипных месторождений и даже в рудах одного месторождения. Стадийность рудообразования приводит к образованию нескольких генераций или

разновидностей одних и тех же минералов, отличающихся морфологией выделения, составом, строением и физическими свойствами.

Примером изоморфизма в минералах являются минералы руд Томторского месторождения. Замещение катионов кальция и натрия на стронций, барий и свинец определяет несколько разновидностей пирохлора - от первичного неизмененного Ca-Na пирохлора, гипергенно измененного Sr-Ba-пирохлора, интенсивно измененного Pb-пирохлора (рис. 3). В минералах группы крадаллита прослеживаются изоморфные замещения во всех группах катионов (структурных позициях). Катионы А группы крадаллита определяют минеральные виды, являющиеся крайними членами ряда: крадаллит (Ca), гоацит (Sr), горсейксит (Ba) и флоренсит (Ce, La). В действительности минералы группы крадаллита имеют смешанные составы, доминируют при этом минеральные фазы промежуточного состава между флоренситом и гоацитом.

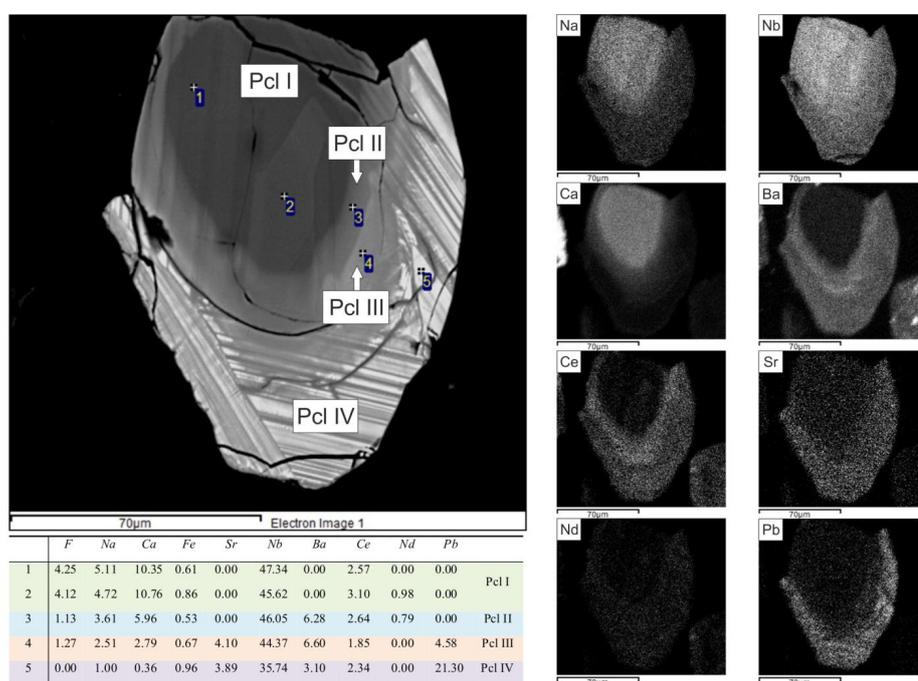


Рис. 3. Гипергенно преобразованный пирохлор, изображения в рентгеновском характеристическом излучении по результатам рентгеноспектрального микроанализа

Особенностью томторских руд является присутствие в них циркониевого ксенотима. Образование циркониевой разновидности ксенотима связано с изоструктурностью ксенотима и циркона, обусловленной входением циркония в структуру ксенотима. Это подтверждается прямой корреляцией между содержаниями ZrO_2 и SiO_2 в ксенотиме и обратной корреляцией $Zr+Si$ и $Y+P$.

Минеральный состав. Редкометалльные руды, за редким исключением, являются комплексными полиминеральными образованиями, в которых полезные минералы могут быть представлены несколькими минеральными видами, тесно ассоциирующими между собой и встречающимися в переменном количестве. Например, количество полезных минералов в редкометалльных пегматитах, гранитах и полевошпатовых метасоматитах составляет 6-9, в

карбонатитах и корах выветривания карбонатитов – 4. Помимо этого, некоторые рудные минералы (пирохлор, лопарит, микролит, циркон и др.) могут быть подвергнуты процессам метамиктизации с образованием метамиктных (утративших кристаллическое строение) и частично метамиктных (с поврежденным кристаллическим строением) форм. Среди рудообразующих минералов нередко значительная доля приходится на породообразующие минералы. На формирование современного облика руд оказывают влияния вторичные изменения. Следовательно, полиминеральный состав руд обусловлен одновременным присутствием минералов разных ассоциаций, которые не всегда однозначно можно выделить.

Быховский Л.З., Кудрин В.С., Потанин С.Д., Эпштейн Е.М., Усова Н.А., Архангельская В.В. и другие исследователи отмечали сложный полиминеральный состав руд. Одновременное присутствие нескольких минералов ниобия и редких земель, каждый из которых представляет промышленную ценность, их переменное содержание, в основном в незначительных количествах, присутствие полезных минералов других металлов (фосфора, железа, марганца, урана, тория, алюминия, титана и пр.) заметно влияют на комплексность руд. Различные минералы каждого металла обладают собственными физическими (технологическими) свойствами, которые нередко существенно отличаются, поэтому требуются различные технологические решения при разработке технологии переработки руд.

Полиминеральные руды латеритной коры выветривания Чуктуконского месторождения имеют существенно гетитовый состав. Содержание гетита варьирует в значительных пределах и иногда достигает 70 %. В формировании руд принимают участие более 20 минералов. Редкоземельные минералы представлены Се- и La- монацитом, ксенотимом, церианитом и минералами группы крандаллита. За редкометалльную специализацию руд отвечает вторичный пирохлор, представленный несколькими разновидностями (стронциево-цериевой, стронциево-бариевой, стронциевой и смешанной барий-церий-стронциевой). В переменном количестве отмечаются оксиды, гидроксиды марганца и каолинит. Особенностью руд является практически постоянное присутствие пленок гетита на зернах монацита, которые «затушевывают» технологические свойства этого минерала. Рудные минералы тесно ассоциируют друг с другом и породообразующими фазами, образуют сложные по составу полиминеральные агрегаты, нередко отличающиеся высокой дисперсностью.

Более сложным составом отличаются руды Томторского месторождения, в формировании которых принимают участие более 80 минералов, главными и второстепенными среди которых являются: оксиды (пирохлор, ильменорутит, рутил, гетит, гематит), фосфаты (монацит, минералы группы крандаллита, апатит, ксенотим), карбонаты (сидерит), слоистые алюмосиликаты (каолинит, иллит), сульфиды (пирит, марказит, халькопирит, сфалерит, галенит). Большая часть руд представлена тонкодисперсными агрегатами сложного минерального состава (рис. 4).

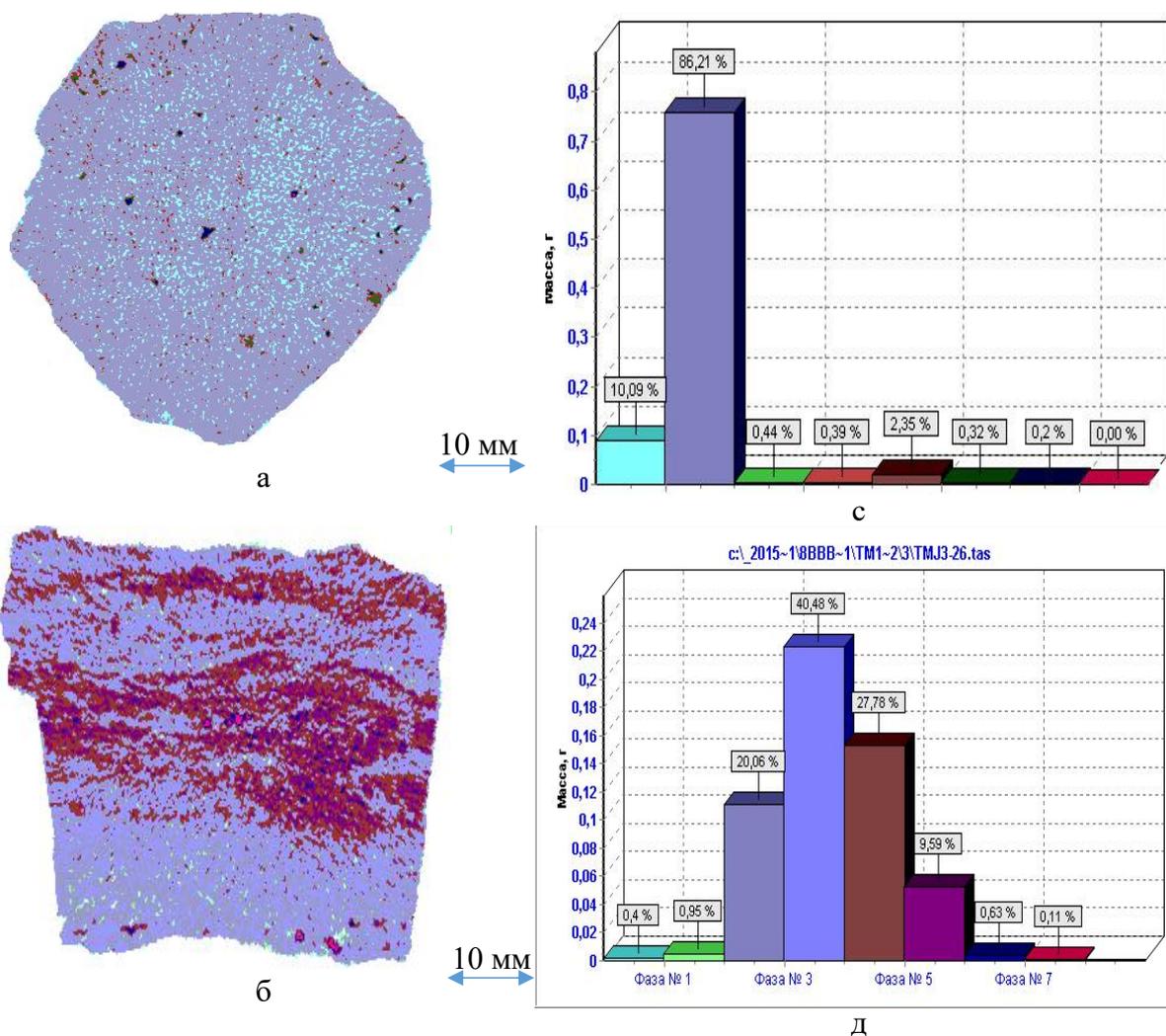


Рис. 4. Тонкодисперсная руда полиминерального состава. Томторское месторождение
 а, б – обработка томограмм по системе «TomAnalysis»;
 с, д – гистограммы соотношения минералов, %;
 голубое и бледно сиреневое – минералы группы крадаллита, светло-зеленое – апатит,
 лососевое – сидерит, коричневое - монацит, темно- зеленое - пироклор измененный,
 темно-синее - пироклор первичный

Таким образом, ниобий-редкоземельные руды отличаются переменным, в целом весьма тонким гранулярным составом со значительной долей дисперсного материала микро-нанометрического размера. Для них типичен полиминеральный состав, обусловленный одновременным присутствием нескольких полезных минералов, ассоциирующих друг с другом и породообразующими фазами в различных сочетаниях и количественных соотношениях. Особенностью руд являются широко развитые в минералах изоморфные замещения, а также различная степень радиоактивности отдельных минералов. Все это в совокупности негативно влияет на обогащение ниобий-редкоземельных руд механическими методами, делая их практически необогатимыми. В то же время именно эти минералогические особенности руд определяют возможность применения при их переработке методов пиро-гидрометаллургического передела, позволяющих получить продукцию широкого ассортимента и требуемого промышленностью качества.

2. Установленное преобладание фосфорсодержащих минералов (монацит и минералы группы крандаллита) над пирохлором позволило в начале процесса селективно отделить ниобий от редкоземельных элементов и впервые разработать технологию комплексной переработки пирохлор-монацит-крандаллитовых руд Томторского месторождения, обеспечивающую получение товарной продукции (Nb_2O_5 , оксиды REE, Sc_2O_3).

Наиболее распространенными рудами месторождения являются волнисто-слоистые, микрослоистые, колломорфные и брекчиевые. Микрослоистость обусловлена чередованием полос субмикрометровой мощности железистого, алюмофосфатного, пирохлорового, монацитового, каолинитового, сидеритового состава. Природа полосчатости руд проявляется во взаимоотношениях двух агрегатов, составляющих основу текстурного рисунка руд: первичного охристого агрегата, присутствующего в реликтовой форме и замещающего его более позднего алюмофосфатного агрегата. Преобразование охристого агрегата в алюмофосфатный начинается с появления отдельных прослоев алюмофосфатов, развивающихся по плоскостям расщепления охристых продуктов выветривания. В результате интенсивного расщепления и эпигенеза охристые продукты выветривания преобразуются в линзовидно-полосчатые породы, содержащие полосы и линзы охристого материала. В конечном итоге происходит полное растворение охристого вещества и развитие на его месте полосчатой, существенно алюмофосфатной породы.

Структура пород разномасштабная от мелко- до микромасштабной, иногда метаколлоидная. Руды имеют сложный характер срастаний минералов и нередко тонкодисперсное строение, которое четко прослеживается на томограммах (рис. 5).

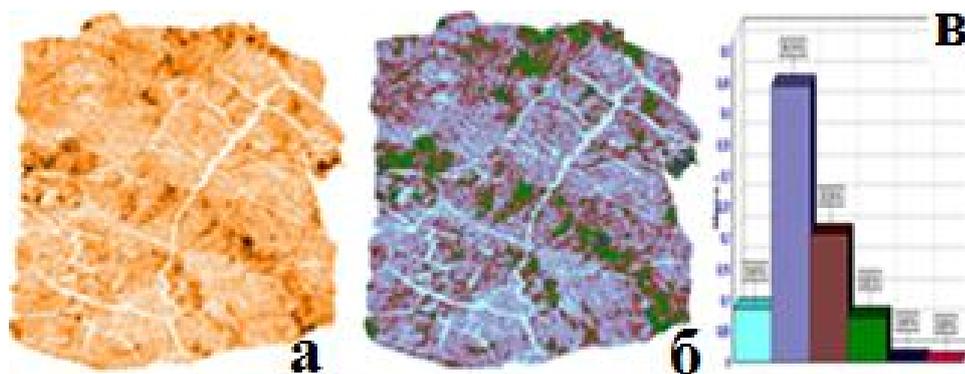


Рис. 5. Пирохлор-монацит-крандаллитовая руда, размер обломков около 1 см:
а – томограмма, б – обработка томограммы по системе «TomAnalysis»,
в – гистограмма соотношения фаз, %. Голубое и бледно-сиреневое – минералы группы крандаллита, светло-зеленое – апатит, лососевое – карбонаты (сидерит), коричневое – монацит, темно-зеленое – пирохлор измененный, темно-синее – пирохлор первичный

По данным химического анализа содержание Nb составляет 3,26%, суммы редких земель – 16,10%, кроме того, компонентами руды являются Al, Fe, P, Ca, составляющие соответственно 6,34%, 3,12%, 9,27% и 3,86%.

Отмечаются высокие содержания Ti (3,87%), V (1,00%), Sr (3,40%), Ba (2,89%), Y (1,03%) и Th (0,31%).

Главными рудными минералами являются минералы группы крандаллита, содержание которых составляет порядка 40-45%, монацит, количество которого достигает 25%, и пирохлор, на долю которого приходится 12%. Остальные минералы (табл. 1) относятся к категории второстепенных. Из акцессорных минералов присутствуют барит, гидроксиды железа, ксенотим.

Таблица 1

Минеральный состав руды
(по данным рентгенографического количественного фазового анализа РКФА)

Минералы	Содержание, масс. %
Минералы группы крандаллита	43
Монацит	25
Пирохлор	12
Сульфиды (пирит, марказит, галенит, сфалерит)	8
Ильменорутил, анатаз	5
Апатит	5
Сидерит	2

Особенностью руды является высокая дисперсность, тесное взаимное срастание минеральных фаз и связь одного и того же полезного компонента с несколькими рудными и породообразующими минералами.

Пирохлор присутствует в виде неравномерной сыпи и гнездовидной вкрапленности в алюмофосфатах. Особенностью пирохлора при гипергенном преобразовании является замещение кальция и натрия на стронций, барий и свинец (рис. 6). Установлены четыре разновидности пирохлора.

Пирохлор I – типичный магматический Ca-Na пирохлор встречается крайне редко в виде реликтовых зон в сравнительно крупных кристаллах или их фрагментах. Отмечается начальная стадия преобразования, выражающаяся в появлении тонкой оторочки, где происходит замещение Ca и Na на Sr и Ba (рис. 6б).

Особенностью химического состава неизмененных пирохлоров является высокое содержание Na, Ca, Nb и P (5,11%, 10,76%, 47,34% и 4,28% соответственно), а также отсутствие Sr, Ba и Pb. Только в этой разновидности пирохлора наблюдается значительное содержание суммы (REE)₂O₃, которое достигает 4%.

В *пирохлоре II* при достаточно высоком содержании Ca и Na (3,43 масс.% и 1,93 масс.% соответственно), наблюдается появление Sr и Ba, доминирующим катионом является Sr. Содержания Nb и P незначительно снижаются до 45 масс.% и 2,76 масс.% соответственно. В *пирохлоре III* содержание Ca и Na ниже чем в пирохлоре II. Содержания Nb и P также продолжают снижаться. Характерной особенностью является появление Pb.

Отличительной особенностью *пирохлора IV* является достаточно высокое содержание Pb (до 23,82%) при очень низких содержаниях Ca и Na. Содержание Nb заметно снижается до 35,74%.

Пирохлор III и *пирохлор IV* находятся в тесных срастаниях. Изменения пирохлоров сопровождались дезинтеграцией крупных кристаллов на мелкие блоки (рис. 6а). При этом микротрещины заполняются в основном минералами группы крандаллита и апатитом, реже сульфидами.

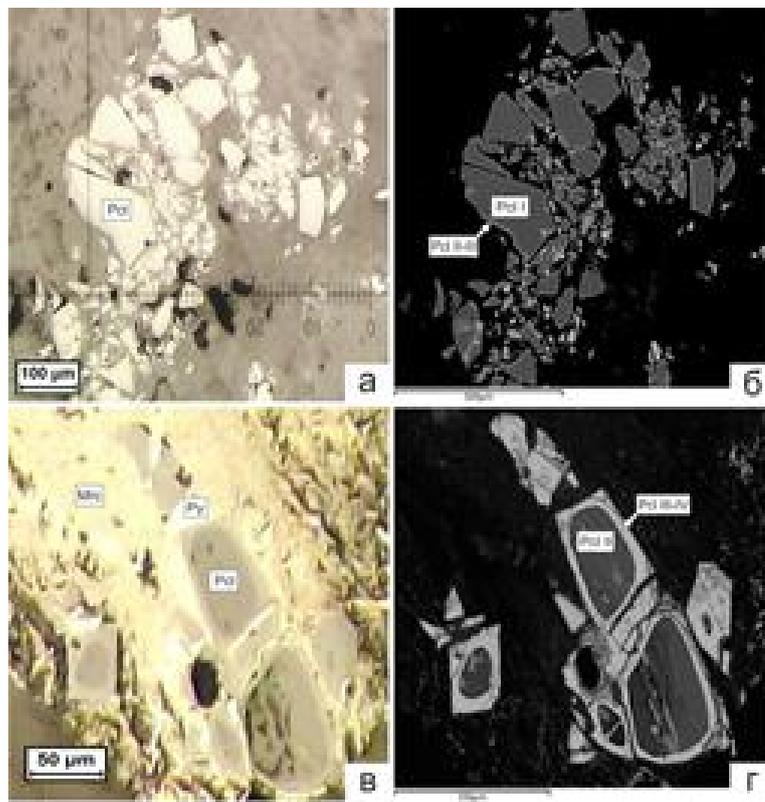


Рис. 6. Внутреннее строение пирохлора: а – дезинтеграция крупных кристаллов на мелкие блоки; б – начальная стадия преобразования пирохлора I, выражающаяся в появлении тонкой оторочки пирохлора II-III; в, г – зональное строение зерен; а, в – отраженный свет, николи параллельны; б, г – изображения в обратно рассеянных электронах

Монацит представлен цериевой разновидностью, образует зерна и обломки округлой, удлиненно-призматической, реже клинообразной формы, нередко корродирован минералами группы крандаллита. При изменении переходит в гидратированную разновидность, зерна приобретают спутано-волокнистый, скелетный облик. Потеря воды ведет к морфоструктурной перестройке агрегатов, что в свою очередь, повышает их хрупкость, снижает твердость и приводит к переизмельчению и накоплению монацита в тонких классах.

Минералы группы крандаллита являются главными минералами руды, по существу они выполняют роль цемента и представлены моно- и чаще полиминеральными агрегатами. Отмечаются достаточно плотные крандаллитовые агрегаты массивного сложения и слабо сцементированные, порошковатые и землистые агрегаты.

По данным электронной микроскопии, четко фиксируются две разновидности монацита: скрытокристаллический блочного микростроения, иногда с элементами метаколлоидных микроструктур, и колломорфный с явно выраженными метаколлоидной, иногда глобулярной микроструктурами. В существенно крандаллитовых агрегатах блочного микростроения (рис. 7 а, б) присутствуют тонкодисперсные гидроксиды железа, анатаз, карбонаты, а также пирохлор и монацит, образующие зерна различного размера, в том числе и нанометрического. В пределах границ разноориентированных трещин происходит перекристаллизация и переотложение материала, проявляющееся в образовании колломорфных выделений, отдельностей, иногда полостей, заполненных тонкодисперсным материалом. В колломорфных агрегатах присутствуют монацит, пирохлор, анатаз, иногда гидроксиды железа, карбонаты.

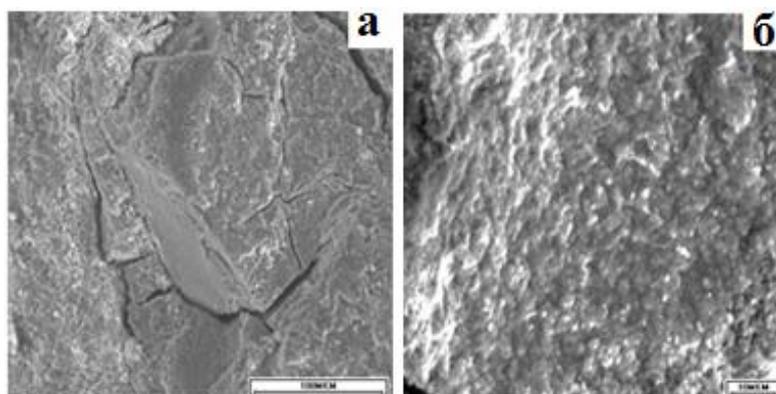


Рис. 7. Крандаллитовые агрегаты блочного микростроения (а); колломорфные агрегаты (б). РЭМ

Установлена неравномерная перекристаллизация метаколлоидного материала с образованием зерен изометричной, округлой и близкой к ним формы, размер которых варьирует от долей нанометра до микрометра. Четко прослеживается сегрегация зерен.

В группу крандаллита входят собственно *крандаллит* ($\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$), *гояцит* ($\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$), *горсейксит* ($\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$), *плюмбогуммит* ($\text{PbAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$), *флоренсит* ($(\text{REE})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$).

Для разработки эффективной технологии получения комплекса всех ценных компонентов требуемого промышленностью качества выполнены исследования по изучению поведения главных рудных минералов при взаимодействии их с растворами гидроксида натрия при температурах, превышающих температуру кипения. Использование гидроксида натрия в качестве вскрывающего реагента приводит к глубоким изменениям фазового состава как пирохлора, так и фосфорсодержащих минералов (монацит, минералы группы крандаллита, апатит). В отсутствие фосфат-иона взаимодействие пирохлора с гидроксидом натрия сопровождается разрушением структуры пирохлора с образованием труднорастворимых метаниобатов натрия (табл. 2).

Установлено, что в присутствии фосфат-ионов, основными носителями которых в рудах являются монацит, минералы группы крадаллита, выщелачивание их раствором гидроксида натрия сопровождается практически полным растворением фосфорсодержащих минералов и конверсией фосфатов REE в их гидроксиды с переходом фосфора в щелочной раствор в виде Na_3PO_4 . При этом уменьшается концентрация свободной щелочи в растворе, что затрудняет разложение пирохлора, который не претерпевает изменений даже в условиях повышенных температур и концентраций гидроксида натрия (табл. 2, 3).

Таблица 2

Фазовый состав продуктов обработки гидроксидом натрия пирохлора без и в присутствии фосфорсодержащих минералов (по данным рентгенографического качественного фазового анализа (РФА))

Концентрация NaOH, г/л	без P_2O_5		с P_2O_5	
	250	Пирохлор	+	Пирохлор
NaNbO_3		+	NaNbO_3	+
Na_3NbO_4		мало	Na_3NbO_4	много
350	Пирохлор	+	Пирохлор	много
	NaNbO_3	много	NaNbO_3	много
	Na_3NbO_4	н/о	Na_3NbO_4	+
450	Пирохлор	н/о	Пирохлор	много
	NaNbO_3	много	NaNbO_3	+
	Na_3NbO_4	н/о	Na_3NbO_4	н/о

Таблица 3

Фазовый состав кека от щелочного вскрытия исходной руды (по данным РКФА)

Минерал	Теоретическая формула	Содержание, масс. %
Гидроксид редких земель	$(\text{Ce}, \text{Nd}, \text{La}) (\text{OH})_3$	18
Гидроксид фосфатцерий стронция	$(\text{Ce}, \text{Sr})_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	9
Пирохлор	$(\text{Ba}, \text{Sr})\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH})$	10
Апатит	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	5
Латрапит	$(\text{Na}, \text{Ca}) (\text{Ti}, \text{Nb})\text{O}_3$	+
Барий кальциевый титанат	$\text{Ba}_3\text{Ca}_2\text{Ti}_2\text{O}_9$	+
Фергусонит	$\text{Y}(\text{Nb}, \text{Ti})_2\text{O}_6$	+

Последующая кислотная обработка щелочного кека обеспечивает получение продуктивного раствора для извлечения REE. При этом ниобий концентрируется в нерастворимом остатке в виде пирохлорового концентрата, переработка которого может быть осуществлена сульфатизацией или выщелачиванием смесью раствора фтористоводородной и серной кислот при повышенных температурах, что сопровождается практически полным разрушением пирохлорового концентрата и переходом

ниобия в зависимости от использованного реагента в растворимые сернокислые либо комплексные фтористые соединения. Установленные закономерности использованы для рекомендаций технологического характера и создания эффективной гидрометаллургической технологии переработки руды Томторского месторождения (рис. 8).

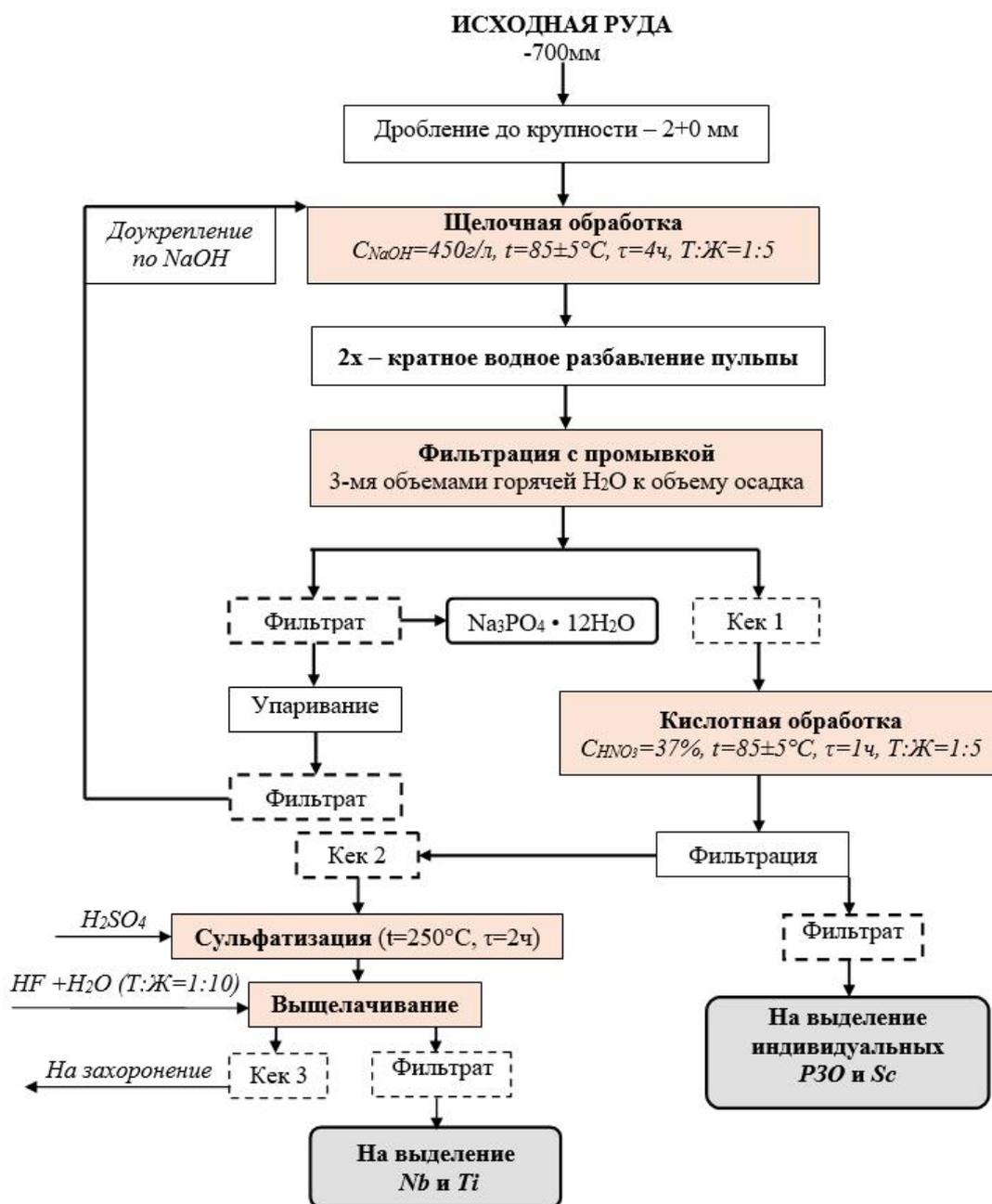


Рис. 8. Технологическая схема переработки пирохлор-монацит-крандаллитовых руд Томторского месторождения

Таким образом, минералогические особенности руд: гранулярный состав, одновременное присутствие нескольких полезных минералов, нередко имеющих разные формы выделения, образующих тесные срастания между собой и с породообразующими фазами, склонность к искусственной сегрегации, позволяют считать руды практически необогатимыми

механическими методами. Изучение влияния фосфорсодержащих минералов на поведение рудных минералов при взаимодействии с кислотными и щелочными реагентами позволило разработать технологию комплексной переработки пирохлор-монацит-крандаллитовых руд Томторского месторождения, обеспечивающую получение товарной продукции ценных компонентов требуемого промышленностью качества.

3. Выявленные закономерности соотношения главных рудных – пирохлора, монацита и нерудных минералов с оксидами, гидроксидами железа и марганца определили технологию переработки комплексных руд Чуктуконского месторождения – нового масштабного источника получения редких металлов.

По минеральному составу руда относится к гетитовому и гетит-гематитовому типам с редкоземельной минерализацией представлена: рыхлой (землистой) и в разной степени уплотненной рудой массивной и пятнистой текстуры.

Главными рудными минералами являются оксиды и гидроксиды железа (до 63%) и марганца (8%) (табл. 4).

Таблица 4

Минеральный состав руды (по данным РКФА)

Минерал	Содержание, %
Гётит	48
Гематит	15
Оксиды и гидроксиды марганца	8
Минералы группы крандаллита	7
Монацит	4
Пирохлор	2
Каолинит	6
Кварц	3
Анаказ	3
Апатит	2
Кальцит	2

Редкоземельные минералы представлены минералами группы крандаллита (7%) и монацитом (4%). Редкометалльные минералы – это стронциево-, бариево-, цериопирохлоры, содержание которых составляет порядка 2%.

Гетит – главный минерал, присутствует в виде тонкодисперсных полиминеральных агрегатов, тесно ассоциирует с минералами марганца. В полиминеральных агрегатах обнаружены гематит, монацит, минералы группы крандаллита, редко отмечается пирохлор. Гетит интенсивно корродирует и замещает другие минералы, в том числе пирохлор. При этом образуются тесные сростания минералов, часто закрытые.

Гематит находится в тонкодисперсном состоянии, образует плотные желваки и натечные корки. В тонкодисперсных полиминеральных агрегатах гематит присутствует в тесной ассоциации с гетитом и минералами группы крандаллита.

Минералы редких земель представлены монацитом, минералами группы крандаллита, церианитом.

Монацит встречается в виде порошковатых масс и пористых агрегатов, сформированных зернами таблитчатой и удлиненно-призматической формы размером первые микрометры. Присутствует в тесной ассоциации с гидроксидами железа, которые образуют вокруг него оболочку (рис. 9).

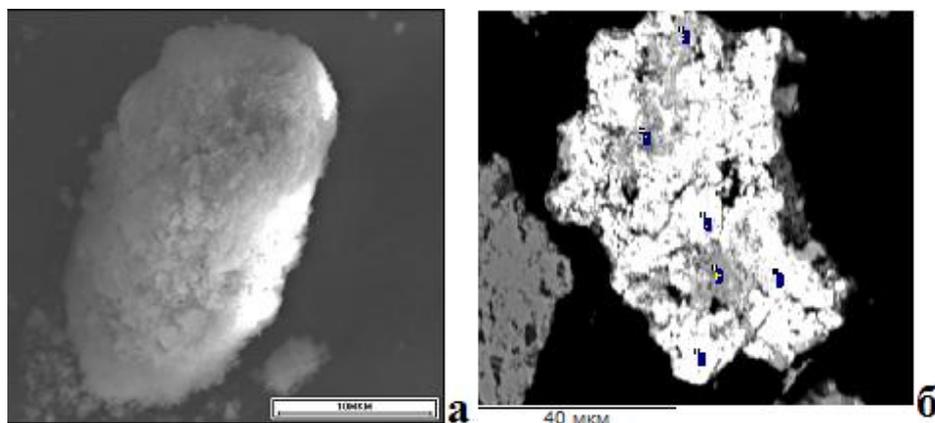


Рис. 9. Тонкодисперсный монацит: в «рубашке» из гидроксидов железа РЭМ (а) и монацит (белое) в гетите (черное). Изображение в отраженных электронах (б)

Монацит представлен в основном Се- и La- разновидностями, кроме того содержит Pr, Nd, Sm. Содержание (%) церия в монаците варьирует от 8,74 до 21,01, лантана изменяется от 11,08–16,43, неодима – 4,98–12,86, празеодима – 1,08–2,09; самария – 0,42–1,79.

Минералы группы крандаллита совместно с гетитом и каолинитом слагают тонкодисперсную основную массу каолинит-гетитовых руд, в меньшей степени – гетитовых руд, образуют гнездовидные скопления в гетит-гематитовых рудах. Присутствуют в виде рассеянных тонкокристаллических выделений и сплошных тонкозернистых агрегатов. Минералы группы крандаллита отличаются преимущественно цериевым составом, содержание церия 13,51-19,86%.

Церианит идентифицирован рентгенографическим анализом в следовых количествах в шаровидных конкрециях сидерита, содержащих кварц и каолинит. Минерал образует агрегаты неправильной, иногда округлой формы (рис. 10). Отличается высоким содержанием церия (49,13–63,15 %).

Пирохлор отмечается в виде тонкой вкрапленности, неравномерно распределенной в руде. В каолинит-гетитовой руде пирохлор наиболее интенсивно изменен. Кристаллы пирохлора полностью или практически полностью замещены гетитом, иногда сохраняется лишь тонкая внешняя оболочка. По данным рентгеноспектрального микроанализа в руде выделены следующие разновидности пирохлора:

- стронций-цериевый, с содержанием церия 10,67–16,94%, стронция – 3,51–6,85%, бария – 1,81–2,78%,
- барий-стронциевый, с содержанием стронция 10,59–12,10%, бария – 3,80–5,97%, церия – 0,00–1,66%,

- смешанный бариевый-стронций-цериевый (Ce – 9,73–8,26%, Sr – 7,74–8,24 %, Ba – 1,54–2,46 %).

Пирохлор всех разновидностей образован в результате гипергенного изменения первичного натрий-кальциевого пирохлора и является вторичным.

Пирохлор присутствует в виде октаэдрических зональных кристаллов (рис. 11), а также образует тонкодисперсные агрегаты совместно с минералами редких земель. Пирохлор обычно сильно трещиноватый, пористый, хрупкий. Иногда кристаллы и зерна имеют скорлуповатую отдельность, они обладают повышенной хрупкостью.

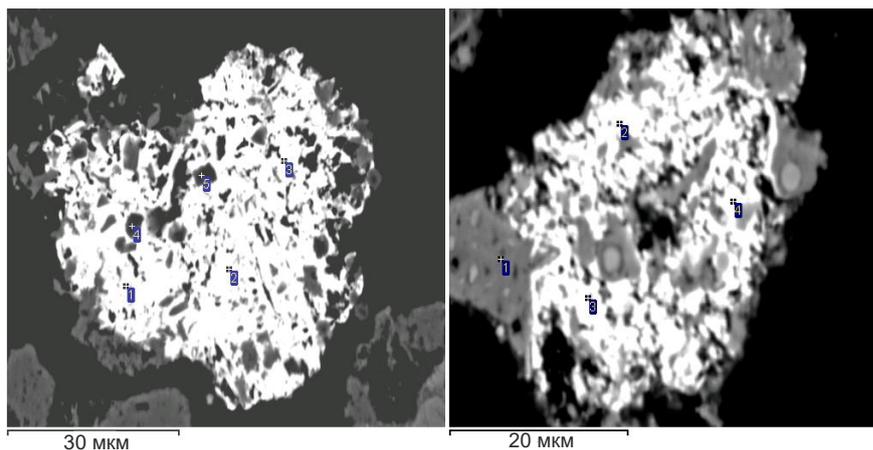


Рис. 10. Тонкодисперсный церианит (белое).
Изображение в отраженных электронах

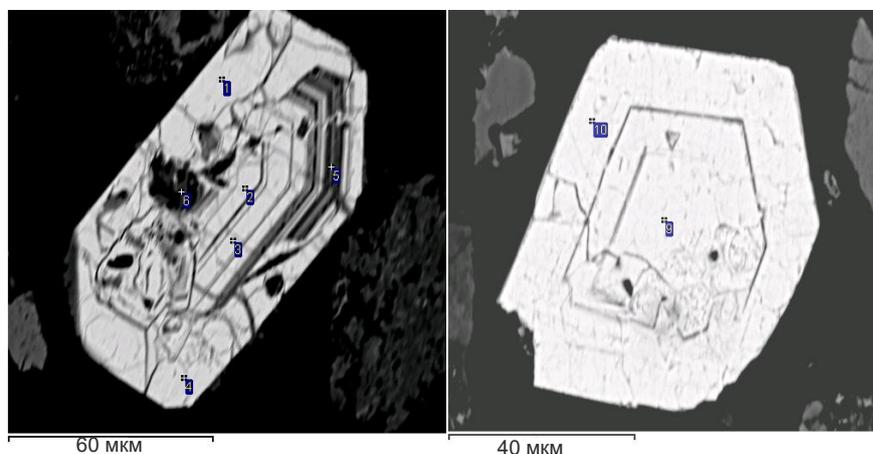


Рис. 11. Зональные интенсивно трещиноватые кристаллы пирохлора.
Изображение в отраженных электронах

Выбор азотной кислоты в качестве вскрывающего реагента для гидрометаллургической переработки обусловлен особенностями ее взаимодействия с рудными минералами: проведение процесса в автоклавных (гидротермальных) условиях при 200-230°C обеспечивает селективное концентрирование ниобия, фосфора и железа в нерастворимом остатке в результате термогидролиза и образования труднорастворимых фосфатов железа (гиниит) (табл. 5). При этом в раствор переходит марганец и нитраты редкоземельных элементов, что позволяет извлечь REE из обесфосфоренных

азотнокислых растворов экстракцией трибутилфосфатом, а также получить товарные соединения марганца.

На основании установленных закономерностей даны рекомендации технологического характера по последовательности проведения операции технологического процесса и создания гидрометаллургической технологии переработки руд Чуктуконского месторождения (рис. 12).

Таблица 5

Фазовый состав ниобийсодержащего кека, %
(по данным РКФА)

Минерал	Формула	Содержание, масс.%
Гётит	$\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$	65
Гематит	Fe_2O_3	6.5
Гиниит	$\text{Fe}_5(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	20
Колумбит	FeNb_2O_6	2
Рутил	TiO_2	1
Рентгеноаморфная фаза		~ 5

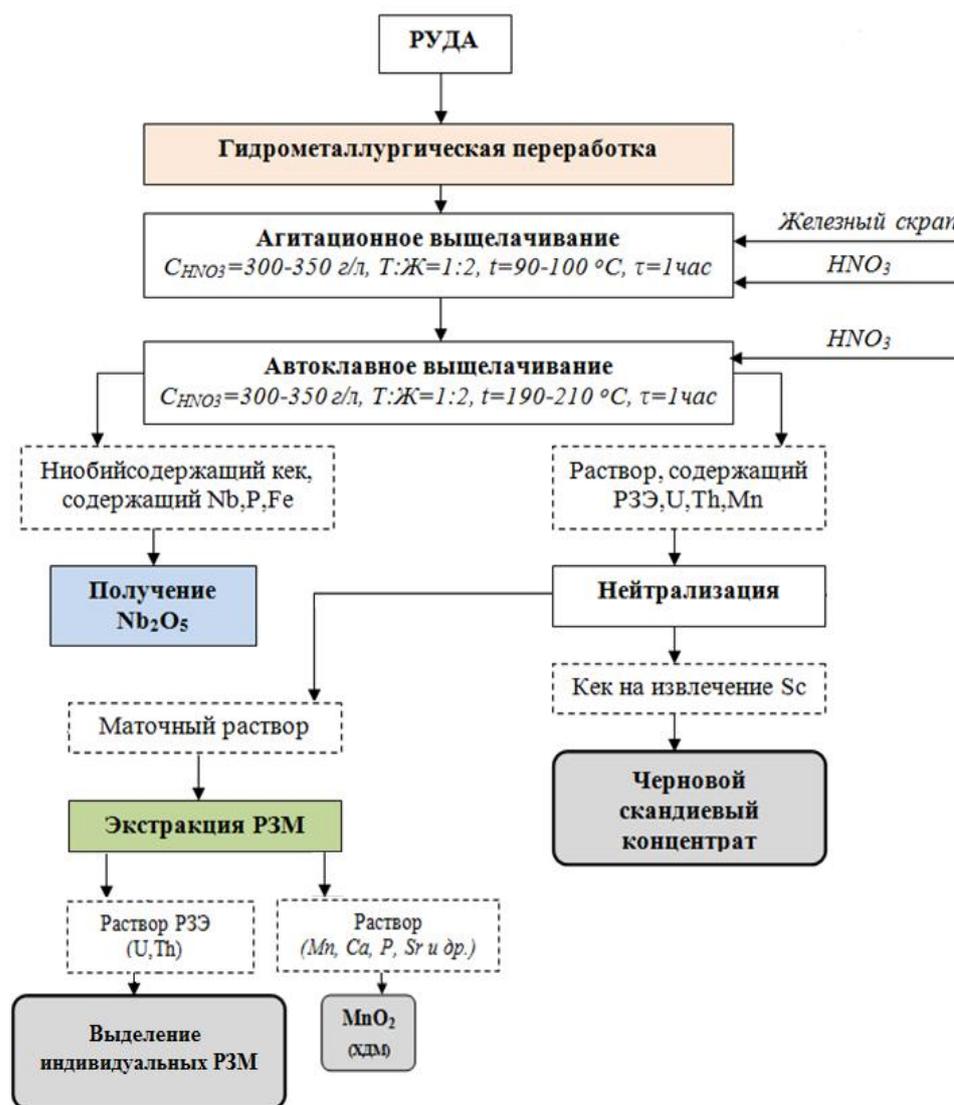


Рис. 12. Технологическая схема переработки пирохлор-монацит-гётитовых руд Чуктуконского рудного поля

Таким образом установлено, что природные особенности руды и полезных минералов (пироклора, монацита, минералов группы крадаллита): высокая дисперсность монацита, минералов группы крадаллита, их тесные срастания с гидроксидами железа, для минералов группы крадаллита – также с каолинитом и между собой, сложные типы срастаний пироклора (коррозионные) с гидроксидами железа, повышенная хрупкость пироклора, склонность к переизмельчению, обуславливают невозможность их раскрытия механическими методами и комплексное извлечение ценных компонентов из этих руд возможно гидрометаллургическими методами переработки. На основании выявленных закономерностей соотношения главных рудных – пироклор, монацит и нерудных минералов – оксиды, гидроксиды железа и марганца разработана технология переработки руд Чуктуконского месторождения, обеспечивающая селекцию марганца, REE от фосфора, ниобия и железа.

4. Глубокое изучение минерального состава трудновскрываемых циркон-бадделеитовых концентратов обогащения руд Алгаминского рудопроявления, распределения новообразованных фаз в продуктах передела, установленная степень концентрирования ценных компонентов в нерастворимом остатке, позволили создать термохимическую (пиро-гидрометаллургическую) технологию их переработки, обеспечивающую получение наряду с диоксидом циркония товарных соединений вольфрама и уранового концентрата.

Циркониевые руды Алгаминского рудопроявления, характеризующиеся одновременным присутствием двух главных циркониевых минералов – бадделеита и циркона, приурочены к терригенно-карбонатным и карбонатным породам порошковатой и землистой текстуры. Структура карбонатных пород преимущественно тонккозернистая, у песчаников реликтовая, обломочная, цемент-базального и контактово-базального типов.

Бадделеит присутствует в виде полиминеральных агрегатов, в которых тесно ассоциирует с породообразующими минералами, иногда с цирконом, образует колломорфные выделения. Зерна бадделеита, как правило, имеют таблитчатую, пластинчатую форму, встречаются фрагменты кристаллов. Нередко зерна имеют сглаженные очертания (рис. 13). Размер зерен варьирует от 12-20 нм до 10 мкм, фиксируется их неоднородное строение. Колломорфные выделения бадделеита отличаются разнообразной формой: грозде-почковидной, секториальной, сферолитовой, хлопьевидной (рис. 13 в, г). Установлены удлиненные веретенovidные «икристые» агрегаты, сформированные округлыми, таблитчатыми зернами бадделеита (рис. 14). Содержание циркония в минерале варьирует от 69,5 до 84,9 %, в большинстве случаев присутствуют гафний в переменном количестве и практически постоянно – уран, которые, вероятно, изоморфно входят в структуру бадделеита.

Циркон представлен в руде колломорфными образованиями, которые в значительном количестве содержат механическую примесь породообразующих минералов, в первую очередь, слоистых алюмосиликатов. Установлены две разновидности минерала, распределенные неравномерно в руде. Преобладает измененный циркон, встречающийся повсеместно в переменных количествах (от 5 до 30 %).

Существующее мнение о широком развитии в этих рудах гель-циркона, видимо, связано с наличием округлых выделений и практически окатанных зерен минерала. Методами электронной микроскопии установлено, что такие выделения в действительности сформированы зернами короткостолбчатой, призматической, панидиоморфной, неправильной изометричной форм, нередко со сглаженными очертаниями, также отмечаются сростки кристаллов. Рентгенографическим анализом подтверждено присутствие в изученных рудах только кристаллического циркона.

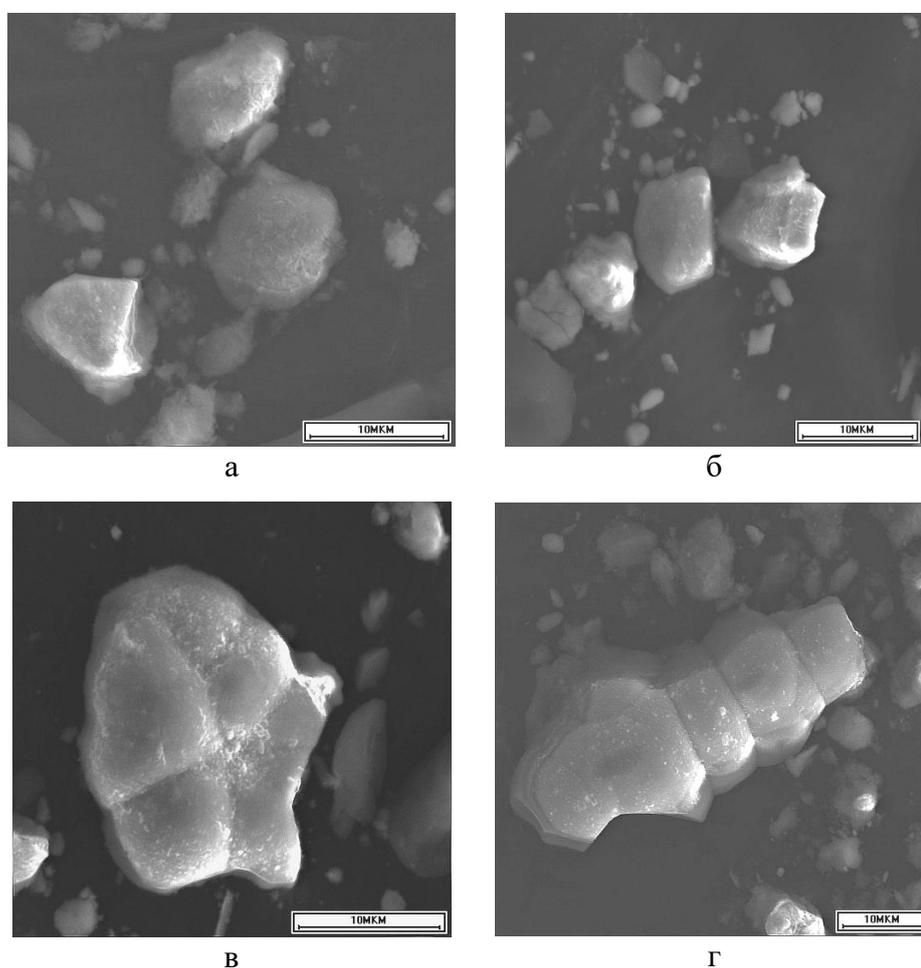


Рис. 13. Кристаллы бадделеита таблитчатой и пластинчатой формы с частично сглаженными очертаниями (а,б); Бадделеит колломорфного микростроения (в, г). РЭМ

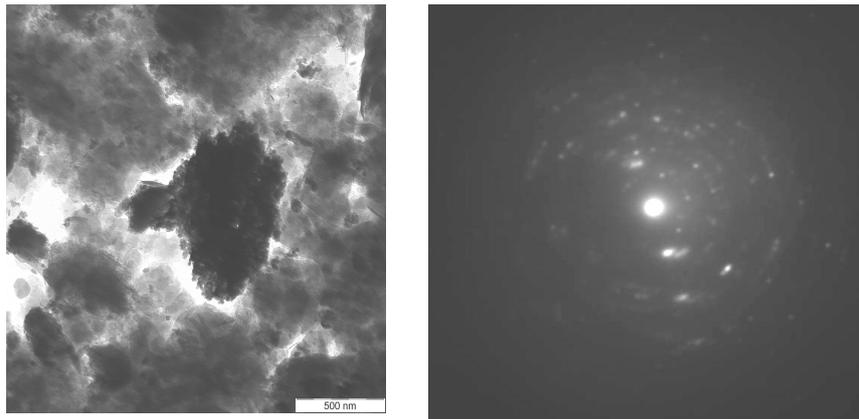


Рис. 14. Удлиненные веретенообразные агрегаты бадделеита «икристого» микростроения; микродифракционная картина минерала. ПЭМ

В основном зерна циркона имеют размер от 0,1 до 7 мкм. Отмечаются и более мелкие зерна размером первые нанометры. Колломорфные агрегаты циркона имеют почковидную и хлопьевидную форму (рис. 15), размер их может достигать 80 мкм. Как правило, в таких агрегатах прослеживаются элементы перекристаллизации материала с образованием слабо индивидуализированных зерен. Электронно-микроскопическими исследованиями четко фиксируется присутствие зерен циркона, в различной степени разрушенных и замещенных по периферии в виде каймы бадделеитом (рис. 16). Следует отметить, что такой циркон, как правило, ассоциирует с бадделеитом «икристого» микростроения. Он нередко также ассоциирует с апатитом, который, как правило, имеет четкие кристаллографические очертания. В апатите обнаружено незначительное содержание циркония, что позволяет предположить присутствие в минерале тонкодисперсных включений циркона. Тонкодисперсные образования циркона нередко отмечаются на поверхности кварца и карбонатов, в этом случае наблюдаются относительно крупные, до 15 мкм, выделения минерала.

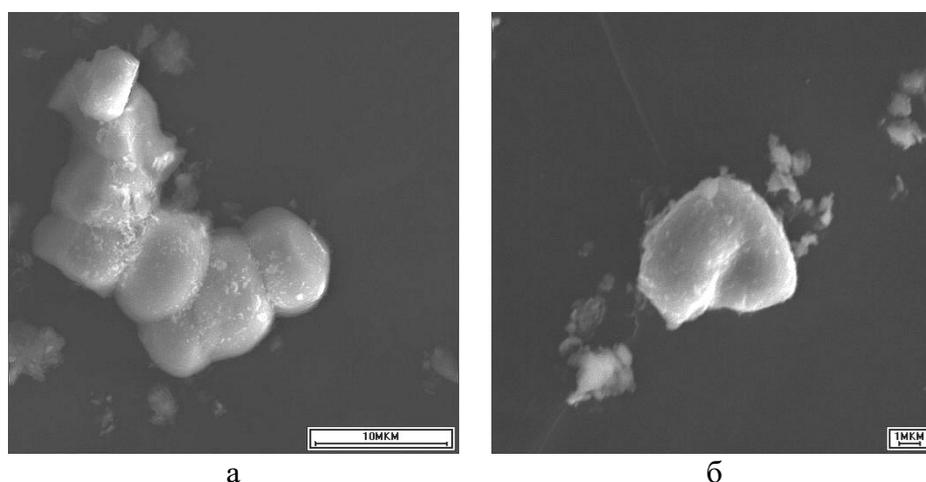


Рис. 15. Колломорфный агрегат циркона. Фрагмент циркона колломорфного микростроения. РЭМ

Циркон отличается нестехеометричным составом. Неизменный циркон, представленный исключительно коллоидными формами, содержит до 51,42% циркония. Повышенное содержание циркония в минерале (55,32-64,27%) связано с присутствием в нем бадделеита в различной форме (включения, коррозионные каймы, заполнение межзерновых пространств в агрегатах и пр.). Отдельные разрушенные зерна циркона отличаются весьма высоким содержанием циркония, порядка 70%, что, вероятно, связано с интенсивными процессами бадделеитизации. В малоизмененном цирконе эпизодически присутствуют скандий и иттрий (десятые доли процента). Закономерность распределения урана в цирконе не прослеживается, его содержание обычно не превышает 0,8 %. И только в единичных случаях достигает 2%. Уран, видимо, входит изоморфно в структуру циркона. Очень редко отмечается присутствие скандия (менее 0,05%). Иногда в цирконовых и бадделеит-цирконовых агрегатах фиксируются ванадий (не более 0,17%), марганец (до 0,39%) и титан (на уровне 0,18%), нетипичные для этой минерализации.

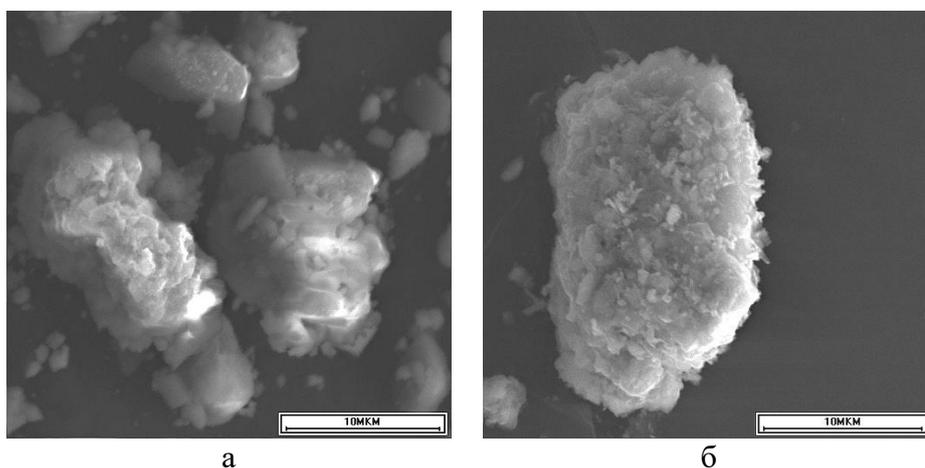


Рис. 16. Хлопьевидный агрегат циркона, сформированный кристаллами панидиоморфной, призматической и неправильной изоморфной формы (а). Агрегат циркона, сформированный короткопризматическими кристаллами (б)

Установлено, что особенностью руд Алгаминского рудопроявления являются формы нахождения циркониевых фаз, которые представляют собой тончайшие срастания микрокристаллов циркона и бадделеита с аморфными фазами.

Для гравитационного бадделеит-цирконового концентрата Алгаминского рудопроявления, состава, %: ZrO_2 – 56,02, P_2O_5 – 0,67, Fe_2O_3 – 0,91, HfO_2 – 0,71, SiO_2 – 34,27, U – 0,029, CaO – 2,12, Y_2O_3 – 0,07, Al_2O_3 – 0,38, WO_3 – 1,20 разработана термохимическая (пиро-гидрометаллургическая) технология, основанная на спекании концентрата с карбонатом кальция, сопровождающаяся рядом химических превращений (1), resultирующихся в появлении в составе спека цирконатов и силикатов кальция (табл. 6).



Фазовый состав спека (по данным РКФА)

Минерал	Содержание, масс.%
Циркон	не обн.
Цирконат кальция	99
Силикат кальция	1
Оксид циркония	не обн.

Примечание: Условия спекания: концентрат:CaCO₃:CaCl₂ = 1:2,5:0,5; t=1000°C, τ=3ч

Различие в растворимости соединений, получаемых при термохимическом вскрытии концентратов, обеспечивает при последующем кислотном выщелачивании спека отделение циркония от основной массы продуктов разложения порообразующих минералов, концентрирующихся в кеке от вскрытия, и переход в раствор циркония. Последующая переработка раствора обеспечивает получение оксидов циркония, вольфрама и уранового хим. концентрата (рис. 17).

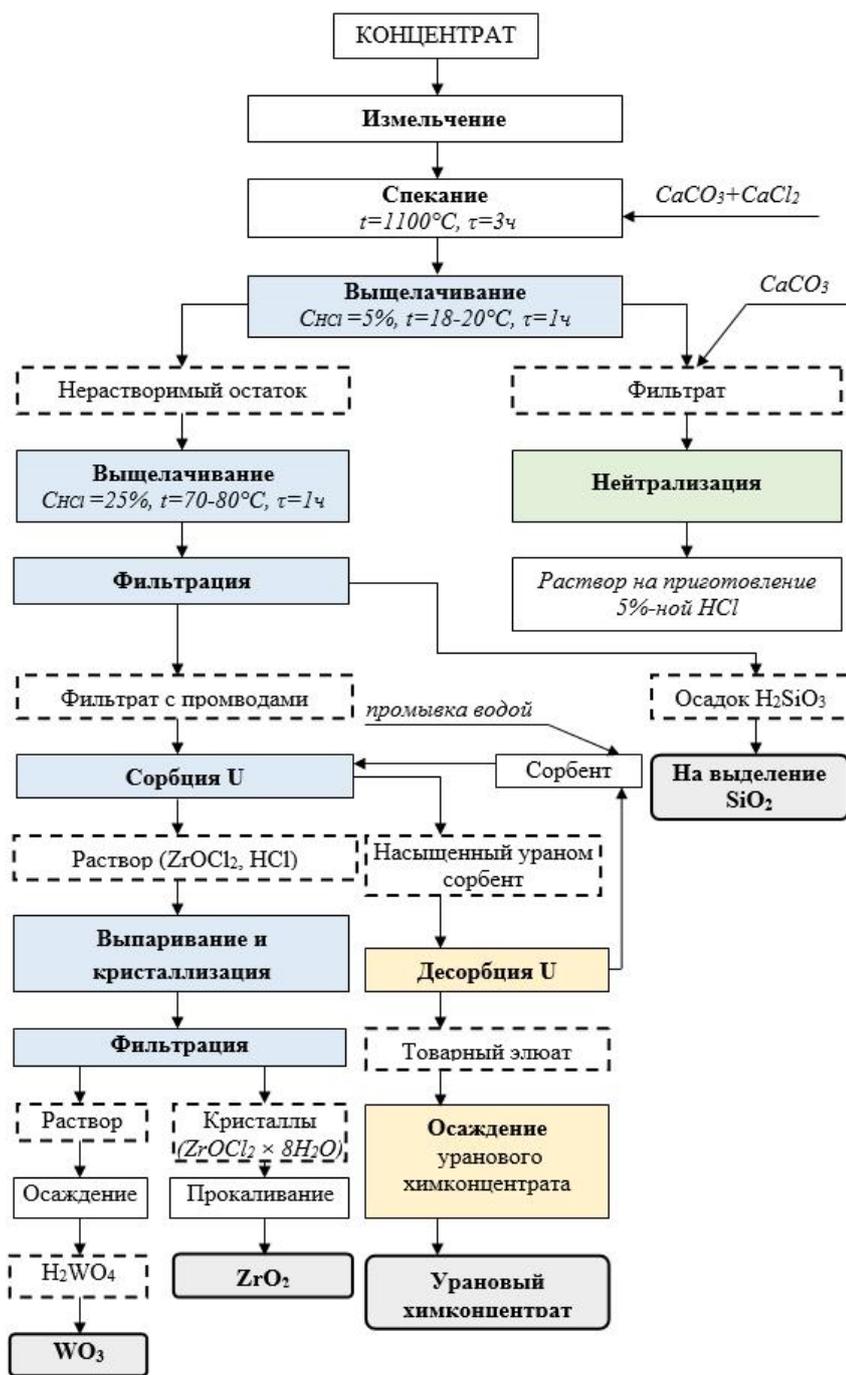


Рис. 17. Принципиальная технологическая схема переработки бадделеит-цирконового концентрата Алгаминского рудопроявления

Таким образом, на основании минералогических особенностей исходных циркон-бадделеитовых концентратов, состава и распределения новообразованных фаз в продуктах передела, степени концентрирования ценных компонентов в нерастворимом остатке и полноты отделения от сопутствующих и породообразующих минералов разработана термохимическая (пиро-гидрометаллургическая) технология переработки трудновскрываемых концентратов обогащения Алгаминского рудопроявления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании опережающего изучения состава и строения редкометалльных руд различного генезиса и проведения экспериментальных исследований определены минералогические критерии выбора технологии их переработки и разработаны принципиальные технологические схемы передела руд редкометалльных месторождений.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Прогнозные минералогические критерии выбора технологий переработки редкометалльных руд позволяют в дальнейшем обосновать оптимальные пути извлечения полезного компонента и обеспечить комплексную переработку руд:

- переменный гранулярный состав с высокой долей тонкодисперсного материала, сформированного индивидами и агрегатами, тесно ассоциирующими между собой,

- полиминеральный состав, обусловленный одновременным присутствием нескольких полезных минералов разных парагенезисов,

- непостоянный химический состав как рудных, так и породообразующих минералов, вызванный широкими изоморфными замещениями атомов химических элементов в кристаллической структуре минералов.

2. Руды Томторского месторождения, содержащие в повышенных концентрациях ниобий, редкоземельные элементы, скандий, отличаются высокой дисперсностью, тесным взаимным срастанием минералов и связью одного и того же полезного компонента с несколькими рудными и породообразующими минералами - минералами группы крандаллита, монацита, пироклора, а также наличием нескольких разновидностей минералов, различающихся по своим физико-механическим и физико-химическим свойствам.

Обогащение руды с использованием механических методов (гравитация, магнитная и электрическая сепарация, флотация) не обеспечивает получение селективных кондиционных концентратов.

Для разработки эффективной технологии получения комплекса ценных компонентов требуемого промышленностью качества из руд Томторского месторождения выполнен комплекс исследований по изучению поведения основных рудных минералов при взаимодействии их с растворами гидроксида натрия. Установлено, что в присутствии фосфат-ионов, основными носителями которых в рудах являются монацит, минералы группы крандаллита, выщелачивание их раствором гидроксида натрия сопровождается практически полным растворением фосфорсодержащих минералов и конверсией фосфатов REE в их гидроксиды с переходом фосфора в щелочной раствор в виде Na_3PO . Тем самым уменьшается концентрация свободной щелочи в растворе и затрудняется разложение пироклора, который не претерпевает изменений даже в условиях повышенных температур и концентраций гидроксида натрия. Последующая кислотная обработка щелочного кека обеспечивает получение продуктивного раствора для извлечения REE. При этом ниобий

концентрируется в нерастворимом остатке в виде пироклорового концентрата, переработка которого может быть осуществлена сульфатизацией или выщелачиванием смесью раствора фтористоводородной и серной кислот при повышенных температурах, что сопровождается практически полным разрушением структуры пироклорового концентрата и переходом ниобия в зависимости от использованного реагента в растворимые сернокислые либо комплексные фтористые соединения. Разработанная технологическая схема позволяет получить: пентаоксид ниобия (Nb_2O_5 – 99,5 %), оксид скандия (Sc_2O_3 – 99,5 %), индивидуальные оксиды REE цериевой группы (99,9 %) и суммарный концентрат REE среднетяжелой группы.

3. Природные особенности пироклор-монацит-гетитовых руд Чуктуконского месторождения и полезных минералов (пироклора, монацита, минералов группы крандаллита): высокая дисперсность монацита, минералов группы крандаллита, их тесные сростания с гидроксидами железа, минералов группы крандаллита с каолинитом и между собой, сложные типы коррозионных сростаний пироклора с гидроксидами железа, повышенная хрупкость вторичного пироклора, склонность к переизмельчению, обуславливают невозможность их обогащения механическими методами. Комплексное извлечение ценных компонентов из этих руд возможно только гидрометаллургическими методами.

На стадии гидрометаллургической переработки пироклор-монацит-гетитовых руд решена проблема отделения редкоземельных металлов от фосфора и железа. Удаление фосфора и железа из раствора достигается проведением процесса в автоклавных (гидротермальных) условиях при 200-230 °С. Это способствует более селективному концентрированию фосфора и железа в нерастворимом остатке в результате образования труднорастворимых фосфатов железа и позволяет уже на следующей стадии извлечь REE из обесфосфоренных азотнокислых растворов экстракцией трибутилфосфатом и получить товарные соединения марганца. Разрабатываемая технологическая схема обеспечивает получение товарных продуктов: индивидуальные оксиды REE (99,9 %), оксид марганца химически чистый (MnO_2 – 90 %), оксид скандия (Sc_2O_3 – 99,5 %), оксид железа (Fe_2O_3 – 87 %), пентаоксид ниобия (Nb_2O_5 – 99,5 %) или ниобиевые лигатуры.

4. Бадделеит-цирконовые руды Алгаминского рудопроявления отличаются переменным содержанием циркона и бадделеита. Особенности состава и строения руд определяют перспективы их переработки пирогидрометаллургическими методами. Для бадделеит-цирконовых концентратов Алгаминского рудопроявления разработана термохимическая (пиро-гидрометаллургическая) технология, основанная на спекании концентратов с карбонатом кальция. Различие в растворимости соединений, получаемых при термохимическом вскрытии концентратов, обеспечивает при последующем кислотном выщелачивании спека отделение циркония от основной массы продуктов разложения породообразующих минералов, концентрирующихся в кеке от вскрытия. Последующая переработка цирконийсодержащего раствора обеспечивает получение товарных продуктов соответствующего качества: диоксид циркония (ZrO_2 – 99,9 %), вольфрамовый ангидрид (WO_3 – 25 %) и урановый химконцентрат (U_3O_8 –

75 %).

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОБУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Лихникевич, Е.Г.** Комплексная переработка ниобиево-редкоземельно-фосфатных руд гидрометаллургическим способом / Е.Г. Лихникевич, Н.В. Петрова, С.И. Ануфриева // Разведка и охрана недр. – 1999. – № 1. – С. 42-44.
2. **Лихникевич, Е.Г.** Механоактивация как способ повышения экологической безопасности процесса сульфатизации редкометалльного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 7. – С. 335-339.
3. **Лихникевич, Е.Г.** Возможность вовлечения в переработку редкометалльно-уран-ториевых руд по технологии кучного выщелачивания / Е.Г. Лихникевич, С.И. Ануфриева, Н.В. Петрова, А.В. Темнов // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 6. – С. 40-45.
4. **Лихникевич, Е. Г.** Особенности термохимической переработки пироклоровых концентратов / Е.Г. Лихникевич, Ю.И. Лебедева // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 1. – С. 46-48.
5. Быховский, Л.З. Задачи дальнейшего изучения Томторского рудного поля с целью повышения его инвестиционной привлекательности / Л. З. Быховский, Е.И. Котельников, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 9. – С. 20-25.
6. **Лихникевич, Е.Г.** Минералогические аспекты сульфатизации пироклоровых концентратов с повышенным содержанием силикатных и алюмосиликатных фаз / Е.Г. Лихникевич, Ю.И. Лебедева, С.И. Ануфриева // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 11. – С. 42-46.
7. **Лихникевич, Е.Г.** Дезактивация пироклоровых концентратов / Е.Г. Лихникевич // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 5. – С. 57-58.
8. **Лихникевич, Е.Г.** Принципиальная термохимическая технология переработки циркон-бадделеитовых концентратов / Е.Г. Лихникевич [и др.] // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. – 2016. – № 3 (255). – С. 18-25.
9. **Лихникевич, Е.Г.** Поведение радиоактивных элементов при дезактивации бадделеит-цирконовых концентратов обогащения / Е.Г. Лихникевич, А.С. Фатов, Е.Н. Левченко // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 4. – С. 48-51.
10. **Лихникевич, Е.Г.** Особенности поведения марганца и редкоземельных элементов при гидрометаллургической переработке комплексных редкометалльно-редкоземельных руд / Е.Г. Лихникевич, Н.А. Пермякова, Н.А. Сычева // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 7. – С. 51-54.
11. Пермякова, Н.А. Поведение редкоземельных металлов при гидрометаллургической переработке пироклор-монацит-гётитовых руд / Н.А. Пермякова, Е.И. Лысакова, С.И. Ануфриева, **Е.Г. Лихникевич** // Тонкие химические технологии. – 2018. – № 3. – С. 64-71.

12. **Лихникевич, Е.Г.** Опережающие минералогические исследования – основа для прогнозирования технологических свойств и выбора оптимальных технологических решений / Е.Г. Лихникевич // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 10. – С. 24-29.

13. **Лихникевич, Е.Г.** Минералогические критерии выбора технологии переработки руд редких металлов / Е.Г. Лихникевич, Е.Г. Ожогоина, А.С. Фатов // Вестник ИГ Коми НЦ УРО РАН. – 2019. – № 4. – С. 42-48.

14. Ануфриева, С.И. Технология переработки труднообогатимых силикатных руд электротермическим способом с получением силикомарганца / С.И. Ануфриева, **Е.Г. Лихникевич**, В.М. Ермолов, Л.П. Тигунов // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 7. – С. 43-49.

15. **Лихникевич, Е.Г.** Гидрометаллургические процессы селективного вскрытия минерального сырья / Лихникевич Е.Г. и [и др.] // Цветные металлы. – 2020. – № 3. – С. 27-31.

Монографии

16. Практика переработки уранового сырья. Монография / Петрова Н.В., Ануфриева С.И., Печенкин И.Г., **Лихникевич Е.Г.** – М.: ВИМС, 2008. – 269 с.

17. Редкоземельное и скандиевое сырье России. Минеральное сырье. № 31 / Л.З. Быховский, **Е.Г. Лихникевич** [и др.]. – М.: ВИМС, 2016. – 217 с.

Статьи в журналах и сборниках

18. Петрова, Н.В. Влияние особенностей структуры и состава тантало-ниобатов на их поведение в технологических процессах / Н.В. Петрова, Т.Н. Шурига, **Е.Г. Лихникевич (Кузнецова)**, Г.А. Сладкова // Сб. науч. тр. – Современные химико-металлургические методы переработки комплексного рудного сырья. – М.: 1985. – С. 65-71.

19. **Лихникевич, Е.Г.** Влияние особенностей поведения рудных и породообразующих минералов в составе руд Томторского месторождения на эффективность технологии переработки / Е.Г. Лихникевич [и др.] // Новые идеи в науках о Земле: тез. докл. III междунар. конф. – Москва, 1997. – М.: МГРИ, 1997. – С. 77-78.

20. Петрова, Н.В. Принцип формирования технологических схем при переработке комплексных тантало-ниобиевых концентратов / Н.В. Петрова, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке: тез. докл. на междунар. симп. / под ред. Машковцева Г.А. – Москва, 5-9 ноября 1998г. – М.: 1998. – С. 65-82.

21. Петрова, Н.В. Комплексная переработки ниобий-редкоземельно-фосфатных руд гидрометаллургическим методом / Н.В. Петрова, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов в XXI веке. Минеральное сырье. – 2000. – Т. 2. – № 7. – С. 145-149.

22. Ануфриева, С.И. Гидрометаллургические технологии при комплексной оценке карбонатитовых редкометалльных месторождений / С.И.

Ануфриева, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Природные и техногенные россыпи и месторождения кор выветривания на рубеже тысячелетий: тез. докл. XII междунар. совещ. / под ред. Н.А. Шило, Н.Г. Патык-Кара, Ю.Ю. Бугельский, Л.З. Быховский, Н.В. Гореликова. – М., 25-29 сентября 2000г. – М.: ИГЕМ РАН, 2000. – С. 22-23.

23. **Лихникевич, Е.Г.** Интенсификация процесса сульфатизации редкометалльного сырья / **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Комплексная переработка нетрадиционного титано-редкометалльного и алюмосиликатного сырья: современное состояние и перспективы: матер. междунар. конф. / под ред. А.Н. Николаева. – Апатиты, 4-8 апреля 2006 г. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2006. – С. 31-33.

24. Петрова, Н.В. Принципы построения технологических схем при переработке труднообогатимого редкометалльного сырья / Н.В. Петрова, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Комплексная переработка нетрадиционного титано-редкометалльного и алюмосиликатного сырья: современное состояние и перспективы: матер. междунар. конф. / под ред. А.И. Николаева. – Апатиты, 4-8 апреля 2006 г. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2006. – С. 40-42.

25. Ануфриева, С.И. Технологические исследования получения урана из различных видов минерального сырья / С.И. Ануфриева, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Матер. науч.-техн. совещ. «Уран России. ФГУП «ВНИИХТ». – Москва, 20-21 ноября 2007г. – М.: ФГУП «ЦНИИ-АТОМИНФОРМ», 2008. – С. 148-151.

26. Ануфриева, С.И. Техногенные образования – источники получения редких металлов (Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Федеральное агентство по недропользованию) / С.И. Ануфриева, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Матер. выездной сессии науч. сов. РАН по науч. основам хим. технологии – Новосибирск, 20-22 октября 2009г. – Новосибирск, 2009. – С. 28-31.

27. **Лихникевич, Е.Г.** Особенности кондиционирования пирохлорового концентрата обогащения руд коры выветривания Белозиминского месторождения для использования в ферросплавной промышленности / **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Научные основы и современные процессы комплексной переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения – 2010): матер. междунар. совещ. – Казань, 13-18 сентября 2010 г. – Казань: ООО «Московский издательский дом», 2010. – С. 328-331.

28. **Лихникевич, Е.Г.** Гидрометаллургические технологии извлечения редких и редкоземельных элементов из редкометалльных месторождений Сибири / **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Матер. междунар. совещ. «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2013)». – Россия, Томск, 16-19 сентября 2013г. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 314-316.

29. **Лихникевич, Е.Г.** Влияние минерального состава пироклор-монацит-крандаллитовых руд на технологические показатели их переработки / Е.Г. Лихникевич, Е.Г. Ожогина, Ю.М. Астахова // Золото и технологии. – 2016. – № 4. – С. 68-71.

30. Пермякова, Н.А. Изучение поведения марганца и редкоземельных элементов при гидрометаллургической переработке комплексных ниобий-редкоземельных руд / Н.А. Пермякова, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2016): матер. минералогического семинара с междунар. участием / под ред. А.М. Асхабова. – Сыктывкар, 17-20 мая 2016г. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. – С. 195-196.

31. Пермякова, Н.А. Повышение комплексности переработки редкометалльно-редкоземельных руд / Н.А. Пермякова, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья (Плаксинские чтения – 2016): матер. междунар. конф. / под ред. В.А. Чантурия, А.П. Козлов, Т.В. Чекушина. – Санкт-Петербург, 26-30 сентября 2016 г. – М.: АО «Издательский дом «Руда и Металлы», 2016. – С. 277.

32. **Лихникевич, Е.Г.** О поведении редкоземельно-редкометалльных руд в процессах химико-металлургической переработки / Е.Г. Лихникевич, Е.Г. Ожогина // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья (Плаксинские чтения – 2016): матер. междунар. конф. / под ред. В.А. Чантурия, А.П. Козлов, Т.В. Чекушина. – Санкт-Петербург, 26-30 сентября 2016 г. – М.: АО «Издательский дом «Руда и Металлы», 2016. – С. 328-330.

33. Ануфриева, С.И. Комплексный подход к технологической оценке редкометалльных руд Томторского рудного поля / С.И. Ануфриева, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Роль геохимии в развитии минерально-сырьевой базы ТПИ. Прогноз, поиски, оценка и инновационные технологии освоения редкометалльных объектов: тез. докл. всероссийской науч.-прак. конф. с междунар. участием (ФГУП «ИМГРЭ») / под ред. А.А. Кременецкого, И.Г. Спиридонов. – Москва, 24-25 ноября 2016 г. – М.: ИМГРЭ, 2016. – С. 163-164.

34. Левченко, Е.Н. Особенности вещественного состава и технология переработки цирконийсодержащих руд Алгаминского рудопроявления / Е.Н. Левченко, Е.Г. Ожогина, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Роль геохимии в развитии минерально-сырьевой базы ТПИ. Прогноз, поиски, оценка и инновационные технологии освоения редкометалльных объектов: всероссийская науч.-прак. конф. с международным участием. – Москва, 24-25 ноября 2016 г. – М.: ФГУП «ИМГРЭ», 2016. – С. 149-151.

35. Permyakova, N.A. On the possibility of complex processing of rare-earth-rare-metal ores by combined hydrometallurgical and pyrometallurgical methods / N.A. Permyakova, **E.G. Likhnikovich**, A.S. Fatov. // High-Tech in Chemical Engineering – 2016: Abstract of XVI International Scientific Conference

with elements of school of young scientists. – Moscow, Russia, 10-15 October 2016. – М.: МИТНТ. – Р. 184.

36. Пермякова, Н.А. Обоснование метода извлечения РЗЭ при гидрометаллургической переработке пироклор-монацит-гётитовых руд / Н.А. Пермякова, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // XI Конгресс обогатителей стран СНГ: сб. матер. – Москва, 13-15 марта 2017 г., – М.: МИСиС, 2017. – С.111-114.

37. Ануфриева, С.И. Комплексный подход к технологической оценке пироклор-монацит-гётитовых руд / С.И. Ануфриева, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ и РМ 2017: сб. матер. междунар. науч.-практ. конф. (Гинцветмет – 2017) / под ред. Е.Ю. Быховская, О.А. Рыбкина. – Москва, 21-22 июня 2017 г. – М.: ОАО «Институт «Гинцветмет», 2017. – С. 67-70.

38. Астахова, Ю.Н. Минералогические особенности ниобий-редкоземельных руд, определяющие необходимость их гидрометаллургического передела / Ю.Н. Астахова, **Е.Г. Лихникевич** // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): матер. междунар. конф. / под ред. В.А. Чантурия, Д.В. Чекушина, А.П. Козлов. – Красноярск, 12-15 сентября 2017 г. – Красноярск: Сиб.федер ун-т, 2017. – С. 45-47.

39. **Лихникевич, Е.Г.** Выбор способа рациональной гидрометаллургической переработки комплексных труднообогатимых редкоземельно-редкометалльных руд / Е.Г. Лихникевич, С.И. Ануфриева, А.С. Фатов // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): матер. междунар. науч. конф. / под ред. В.А. Чантурия, А.П. Козлов, Т.В. Чекушина. – Красноярск, 12-15 сентября 2017 г. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 309.

40. **Лихникевич, Е.Г.** Технологическая оценка пироклор-монацит-гётитовых руд Чуктуконского рудного поля в рамках геолого-технологического картирования / Е.Г. Лихникевич и [и др.] // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): матер. междунар. науч. конф. / под ред. В.А. Чантурия, А.П. Козлов, Т.В. Чекушина. – Красноярск, 12-15 сентября 2017 г. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 66-68.

41. Левченко, Е.Н. Особенности вещественного состава и технологии переработки цирконийсодержащих руд Алгаминского рудопроявления / Е.Н. Левченко, **Е.Г. Лихникевич** // XI Конгресс обогатителей стран СНГ. Сб. матер. – Москва, 13-15 марта 2017г. – М.: МИСиС, 2017. – С.11-16.

42. Ануфриева, С.И. Природные и техногенные источники получения функциональных материалов на основе редких земель и скандия / С.И. Ануфриева, **Е.Г. Лихникевич** [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Химия и материаловедение. – 2018. – № 2. – С. 118-121.

43. Пермякова, Н.А. Технологические особенности пироклор-монацит-гётитовых руд и выбор технологии их переработки / Н.А. Пермякова, **Е.Г. Лихникевич**, Ф.И. Отрубянников // Труды Кольского

научного центра РАН. Химия и материаловедение. – 2018. – № 2. – С. 184-187.

44. Anufrieva, S.I. Comprehensive hydrometallurgical processing of radioactive rare-metal concentrates / S.I. Anufrieva, **E.G. Likhnikovich**, N.A. Permyakova // Congress proceedings «XXIX International mineral processing congress (IMPC 2018)» – Moscow, September, 17-21, 2018. – Printed in: Chuvashia PPC, 2018. – P. 3838-3845.

45. **Лихникович, Е.Г.** Минералогические особенности концентратов обогащения циркониевых руд Алгаминского рудопроявления, определяющие выбор технологии их переработки / Е.Г. Лихникович, Е.Г. Ожогина // Сб. матер. междунар. науч.-прак. конф. «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов». – Алматы, 27-29 сентября 2018 г. – Алматы: АО «ИМиО, 2018. – С. 142-145.

46. **Лихникович, Е.Г.** Опережающие минералогические исследования – основа для прогнозирования технологических свойств и выбора оптимальных технологических решений / Е.Г. Лихникович // Роль технологической минералогии в рациональном недропользовании: сб. материалов рос. совещ. с междунар. участием. – Москва, 15-16 мая 2018г. – М.: РИС «ВИМС», 2018. – С. 20-23.

47. Ануфриева, С.И. Технологические проблемы комплексной переработки руд Томторского рудного поля / С.И. Ануфриева, **Е.Г. Лихникович** // Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов: сб. материалов III всероссийской науч. конф. с междунар. участием / под ред. А.И. Николаева. – Апатиты, 18-20 апреля 2018г. – Изд-во Кольского научного центра РАН, 2018. – С. 115-117.

48. Ануфриева, С.И. Комбинированные гидрометаллургические схемы переработки труднообогатимых редкометалльных руд / С.И. Ануфриева, **Е.Г. Лихникович**, А.А. Рогожин // Интенсификация гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сырья. Технологии и оборудование: матер. междунар. науч.-прак. конф. / под ред. Е.Г. Полякова, С.В. Жукова. – СПб., 28 мая-01 июня 2018г. – Изд-во: СПбГТИ (ТУ), 2018. – С. 91-92.

49. Левченко, Е.Н. Особенности технологии переработки комплексных редкометалльных руд / Е.Н. Левченко, **Е.Г. Лихникович** // Сб. матер. Конгресса обогатителей стран СНГ. – Москва, 25-27 февраля 2019г. – М.: ИТЕП, 2019. – С. 33-37.

50. Курков, А.В. Экологически щадящие энергосберегающие гидрометаллургические процессы селективного вскрытия упорного минерального сырья / А.В. Курков, **Е.Г. Лихникович** [и др.] // Сб. матер. Конгресса обогатителей стран СНГ. – Москва, 25-27 февраля 2019г. – М.: ИТЕП, 2019. – С. 149-154.

51. Ozhogina, E. Modern methods of technological mineralogy in assessing the quality of rare metal raw materials / E. Ozhogina, **E. Likhnikovich** et al. // Springer proceedings in Earth and environmental sciences: theses of the 14th

International congress for applied mineralogy. – Belgorod, September, 23-27, 2019.
– In: Glagolev S. (Ed.): ICAM, 2019. – P. 119-122.

52. **Лихникевич, Е.Г.** Минералогическое обоснование необходимости применения гидро-пиро-металлургического передела при переработке редкометалльного сырья / Е.Г. Лихникевич, Е.Г. Ожогина, А.С. Фатов // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019): матер. междунар. конф. / под ред. В.А. Чантурия, Т.В. Чекушина. – Иркутск, 9-14 сентября 2019 г. – Иркутск: Изд-во ООО «Репроцентр А1», 2019. – С. 51-54.

Подписано в печать 15.11.2019 г.

Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 1,0

Отпечатано на ризографе.

Тираж 100. Заказ № 22

РИС «ВИМС»

119017, г. Москва, Старомонетный пер. дом 31